AWK'23

11.-12. Mai 2023

Empower Green Production

Tagungsband

WZL | RWTH AACHEN UNIVERSITY

Fraunhofer IPT

Vorwort

Nicht nur eine höhere Energieeffizienz, CO_2-Einsparungen und geringerer Ausschuss kennzeichnen eine nachhaltige Produktion, sondern auch lebensverlängernde Maßnahmen wie ein rechtzeitiger Ersatz bestehender Komponenten durch aufgearbeitete oder solche, die Endkundinnen und -kunden Upgrades mit vollständig neuen Funktionen bieten können. Diese wertsteigernde Kreislaufwirtschaft unterscheidet sich von dem oft intuitiven Verständnis der »Circular Economy« dadurch, dass nicht nur hauptsächlich Rohstoffe und Energie aus gebrauchten Produkten zurückgewonnen werden, sondern vielmehr gebrauchte Produkte und Maschinen gezielt renoviert, industriell aufgewertet und deutlich länger genutzt werden.

Der Digitale Schatten, der im Aachener Exzellenzcluster »Internet of Production« erforscht wurde, schafft die Voraussetzungen dafür, dieses – mit Abstand größte – Nachhaltigkeitspotenzial industrieller Produktion auszuschöpfen: Neue Datentechnologien werden zukünftig dazu beitragen, dass Unternehmen bis zu 50 Prozent ihrer industriell eingesetzten Ressourcen und Emissionen einsparen und gleichzeitig komplexe Serienprodukte bis zu 30 Prozent kostengünstiger als bisher herstellen und anbieten können. Hausgeräte, Autos, Maschinen und Anlagen können so systematisch für ein zweites, drittes oder viertes Leben aufgewertet werden, ohne dass Kundinnen und Kunden auf die Mehrleistung und Attraktivität parallel entstehender Neuprodukte verzichten müssen.

Die Zukunftsfähigkeit produzierender Unternehmen vor dem Hintergrund wachsender globaler Herausforderungen durch den Klimawandel und die damit verbundenen politischen und wirtschaftlichen Maßnahmen sicherzustellen, ist Ziel des 31. AWK, der internationalen Aachener Konferenz für die Produktionstechnik. Das Leitthema des diesjährigen AWK – »Empower Green Production« – steht für die gemeinsamen Bestrebungen von Wissenschaft und Industrie, die dringend notwendige Transformation hin zu einer grünen Produktion zu vollziehen.

In vergangenen Ausgaben unserer Konferenzreihe zeigten wir schon in den 2010er Jahren an Beispielen erfolgreicher Forschungs- und Industrieprojekte, welche Chancen die umfassende Vernetzung von Maschinen und Anlagen bietet. Befasste sich das AWK‘21 noch ausführlich damit, wie die gewonnene Datenbasis als Grundlage für ein »Internet of Sustainability« dienen kann, besteht für uns nun der nächste logische Schritt darin, diese Ressourcen nicht mehr nur wie früher zur Steigerung der Produktivität, sondern vor allem für die Transformation hin zu einer zirkulären Produktion zu nutzen. Durch dieses Konzept der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft könnten beispielsweise auch die ESG-Kriterien um ein Vielfaches besser erreicht werden als mit dem klassischen Ansatz der Circular Economy – bei gleichzeitig höherer industrieller Wertschöpfung.

Anhand erster konkreter Beispiele aus aktuellen Industrie- und Forschungsprojekten möchten wir mit dem AWK'23 zeigen, welche Technologien und Strategien diese Transformation fördern werden, wie Unternehmen aus der Fülle an Methoden ihre individuellen Werkzeuge für den Wandel auswählen können, und bei welchen Herausforderungen die angewandte Produktionsforschung gezielt unterstützen kann. Die vier zentralen Themenblöcke des AWK umfassen Beiträge zu leistungsfähigen, speicheroptimierten und resilienten Dateninfrastrukturen, zu Technologien und Prozessen für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft, zu Modellbildung und Analysen mit dem Ziel einer ressourcenschonenderen Fertigung sowie zu Szenarien und Geschäftsmodellen für eine nachhaltige Wertschöpfung.

Unter dem Leitthema »Empower Green Production« greifen wir die komplexe Herausforderung der Transformation zur wertsteigernden Kreislaufwirtschaft auf und haben unsere Ideen und Konzepte im Rahmen des 31. AWK mit hochkarätigen Teams von Expertinnen und Experten aus Industrie und Wissenschaft diskutiert: Gemeinsam möchten wir Impulse setzen und Unternehmen in bester Tradition des Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquiums dazu befähigen, ihre Produktion gleichermaßen leistungsfähiger und nachhaltiger zu gestalten.

Das AWK'23 ist renommiertes Netzwerktreffen und hybrider Informations-Hub zugleich. Begleitet durch das international hochkarätig besetzte Vortragsprogramm und mit thematischen Besichtigungstouren durch die gastgebenden Forschungseinrichtungen – vor Ort in Aachen ebenso wie digital – bietet die Konferenz einen umfassenden Einblick in die Trends der angewandten Forschung und Entwicklung für Fach- und Führungskräfte aus Industrie und Wissenschaft.

Dieser Tagungsband, der die Inhalte des Veranstaltungsprogramms aufgreift und widerspiegelt, kann dabei als Anregung dienen, mit uns, mit den Expertenteams und mit den Vortragenden ins Gespräch zu kommen und selbst zum aktiven Protagonisten einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft zu werden. Wir freuen uns, unsere Forschungsergebnisse einem weiten Kreis an Interessierten zugänglich zu machen und danken allen, die mit hohem persönlichem Einsatz an der Diskussion sowie der Erstellung der Vorträge und der Beiträge in diesem Buch mitgewirkt haben.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt

Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Günther Schuh

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA

Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren am WZL | RWTH Aachen University und Leiter des Bereichs Prozess- technologie am Fraunhofer IPT

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

Inhaber des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen am WZL | RWTH Aachen University und Leiter des Bereichs Produktionsmaschinen am Fraunhofer IPT

Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt

Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement & Informationsmanagement im Maschinenbau am WZL | RWTH Aachen University und Leiter des Bereichs Produktionsqualität und Messtechnik am Fraunhofer IPT

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh

Inhaber des Lehrstuhls für Produktionssystematik am WZL | RWTH Aachen University und Leiter des Bereichs Technologiemanagement am Fraunhofer IPT

Inhaltsverzeichnis

Grußworte ***1***

Institutsbesichtigungen ***5***

Plenarvorträge ***7***

Session 01: Data structures for resilience ***37***

1.1 Datenstrukturen für eine resiliente Life Cycle Sustainability 38

1.2 Schließen des Kreislaufs mit adaptiver automatisierter Demontage 64

1.3 Neue Modularität und Technologie-Roadmapping 96

Session 02: Resource efficient manufacturing ***125***

2.1 Fertigung für eine Kreislaufwirtschaft 126

2.2 Energie- und Ressourceneffizienz in der Fertigung 151

2.3 Skalierbare Produktion von Energiespeichern 183

Session 03: Production-as-a-service ***213***

3.1 Nachhaltigkeit in Produktionslinien 214

3.2 Nachhaltige Produktion-as-a-Service 247

3.3 Quantifizierung der Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit 277

Session 04: Circular production economy ***303***

4.1 Ordnungsrahmen für eine zirkuläre Produktionswirtschaft 304

4.2 Grüne Re-Montage Upgrade-Fabrik 335

4.3 Neues Qualitätsparadigma für eine nachhaltige Produktion 361

Podiumsdiskussionen ***389***

Impressum ***393***

Grußwort

Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein
Präsident des VDI

Produktionstechnik der Zukunft - resilient, intelligent und nachhaltig

Aktuelle Krisen wie Pandemien und Kriege, aber auch der fortschreitende Klimawandel, führen uns die vor Augen, wie notwendig die Anpassungsfähigkeit von Unternehmen und Gesellschaft gegenüber den Veränderungen von Produktverfügbarkeiten und Logistikketten ist.

In den nächsten Jahren wird es zu weiteren disruptiven Veränderungen kommen. In Deutschland müssen wir uns auf knappe und teure Energie einstellen und unsere Produktionssysteme so ausrichten, dass wir mit den Rohstoffen, die wir einführen, möglichst umsichtig und in geschlossenen Wertschöpfungskreisläufen arbeiten. Eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft, die möglichst unabhängig von fossilen Energieträgern ist, die gleichzeitig die weltweiten Emissions- und Klimaziele erfüllt, und die dazu noch resilient und anpassbar agieren kann, muss unser Ziel sein.

In allen Branchen in Deutschland gilt es, dazu Prozesse zu implementieren, welche die Produktion nachhaltiger machen; wir müssen dekarbonisieren, alle Werk- und Wertstoffe komplett im Kreis führen, Abfälle unmittelbar recyceln und über den gesamten Lifecycle vermeiden, Energie intelligent erzeugen, verteilen und nutzen. Mit der Überschrift „Empower Green Production“ wird deutlich, dass wir uns weiterhin in einem globalen Wettbewerb befinden, in welchem die beste Lösung zählt, um die Produktion wirklich grün zu machen. Das Ziel muss sein, zirkulär zu denken und zu handeln und diesen Wandel möglichst schnell zu vollziehen.

Gemäß der vier R – Rethink, Reuse, Reduce, Recycle – gilt es, den gesamten Produktlebenszyklus ins Auge zu fassen. Da das Recycling meist nur als Downcycling funktioniert, sollte auch Reuse in Kombination mit Refurbishment eine große Rolle spielen, um maximale Effekte zu generieren.

Konkret gilt es, zwei Fußabdrücke eines Produktionsmittels zu betrachten: den der Herstellung der Maschine und den der Nutzung und Entsorgung der Maschine– Also auch hier eine Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus – von cradle to grave!

Ich bin davon überzeugt, dass es Ihnen auf Grundlage Ihrer hervorragenden Forschung und systematischen Entwicklung gelingen wird, eine resiliente, intelligente und nachhaltige Produktionstechnik zu schaffen, welche zur Zukunft unseres Standorts als tragende Säule Europas beitragen wird.

Grußwort

Sibylle Keupen
Oberbürgermeisterin der Stadt Aachen

Multiple Krisen wie Naturereignisse und der Angriffskrieg auf die Ukraine fordern Unternehmen in einer bisher nicht gekannten Weise. Dennoch gilt es, gemeinsam nach vorne zu denken und unsere Zukunft zu gestalten. Die aktuellen Herausforderungen sind auch eine Chance.

Die Transformation zu einer nachhaltigeren, energie- und ressourceneffizienten Industrie und Wirtschaft muss gelingen. Wir stehen in der Verantwortung, den Klimaschutz für die nachfolgenden Generationen sozial und ökonomisch nachhaltig zu gestalten. Dazu müssen wir noch mehr Dynamik entwickeln.

Die produzierende Industrie ist heute immer noch in hohem Maße abhängig von weltumspannenden Logistikketten, fossiler Energie und seltenen Rohstoffen. Eine Kreislaufwirtschaft, die unabhängiger von den fossilen Energieträgern ist, kann zu mehr Resilienz und Sicherheit verhelfen und gleichzeitig dazu beitragen, die weltweiten Emissions- und Klimaziele zu erfüllen.

Wie sich die Abhängigkeit von konventionellen Energielieferanten überwinden lässt, ist Thema des 31. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium. International renommierten Expert*innen aus Industrie, Politik und Wissenschaft diskutieren unter dem Motto „Empower Green Production“ über neue Technologien und Konzepte für eine krisenfestere und gleichzeitig grüne Produktion in der Zukunft.

Für unsere Stadt Aachen ist das Kolloquium ein einzigartiges Aushängeschild und verdeutlicht die Interdisziplinarität und Industrierelevanz dieses Standortes. Allen Beteiligten wünsche ich einen interessanten Austausch über Chancen, Erfahrungen und Ideen.

Grußwort

Prof. Dr.-Ing. Reimund Neugebauer
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft

Nachhaltige, innovative Produktionstechnologien sind zentrale Schlüsselelemente, um die Produktivität im Rahmen der Klimaziele zu steigern, die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu verringern und damit die Wettbewerbsfähigkeit des Technologiestandorts Deutschland langfristig zu sichern.

Insbesondere die digitale Transformation eröffnet zahlreiche Möglichkeiten, industrielle Produktionsprozesse nachhaltig und zirkulär zu gestalten, indem sie Mensch und Maschinen in einem intelligent und in Echtzeit gesteuertem System vernetzt. Basis für die erfolgreiche Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft bilden dabei drei aufeinanderfolgende Stufen: Erstens die Ressourceneffizienz in Form ressourcenschonender Produkte, Prozesse und Produktionssysteme. Darauf aufbauend folgt der Produktkreislauf, d.h. zirkuläre Produkte und ressourcenerhaltende (Re-)Fabrikation und drittens schließlich der Wertstoffkreislauf in Form von zirkulären und nachwachsenden Rohstoffen. Ergänzt und flankiert werden müssen all diese Maßnahmen durch Digitalisierung, KI und Robotik.

Eine hohe Relevanz kommt der nachhaltigen und kreislauffähigen Produktion auch bei der Unabhängigkeit von volatilen Rohstoffmärkten und Kosteneinsparungen durch verbesserten Materialeinsatz zu. Vor diesem Hintergrund passt das vom Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2023 adressierte Leitthema »Empower Green Production« trefflich in die aktuelle Zeit. Essenziell für einen gelingenden Transformationsprozess und die Sicherung unserer internationalen Wettbewerbsfähigkeit sind dabei sowohl eine grundlegende Technologieoffenheit als auch ein enges Zusammenspiel von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Lassen Sie uns gemeinsam die Weichen für eine erfolgreiche Zukunft stellen.

Digital labs

Take a tour!

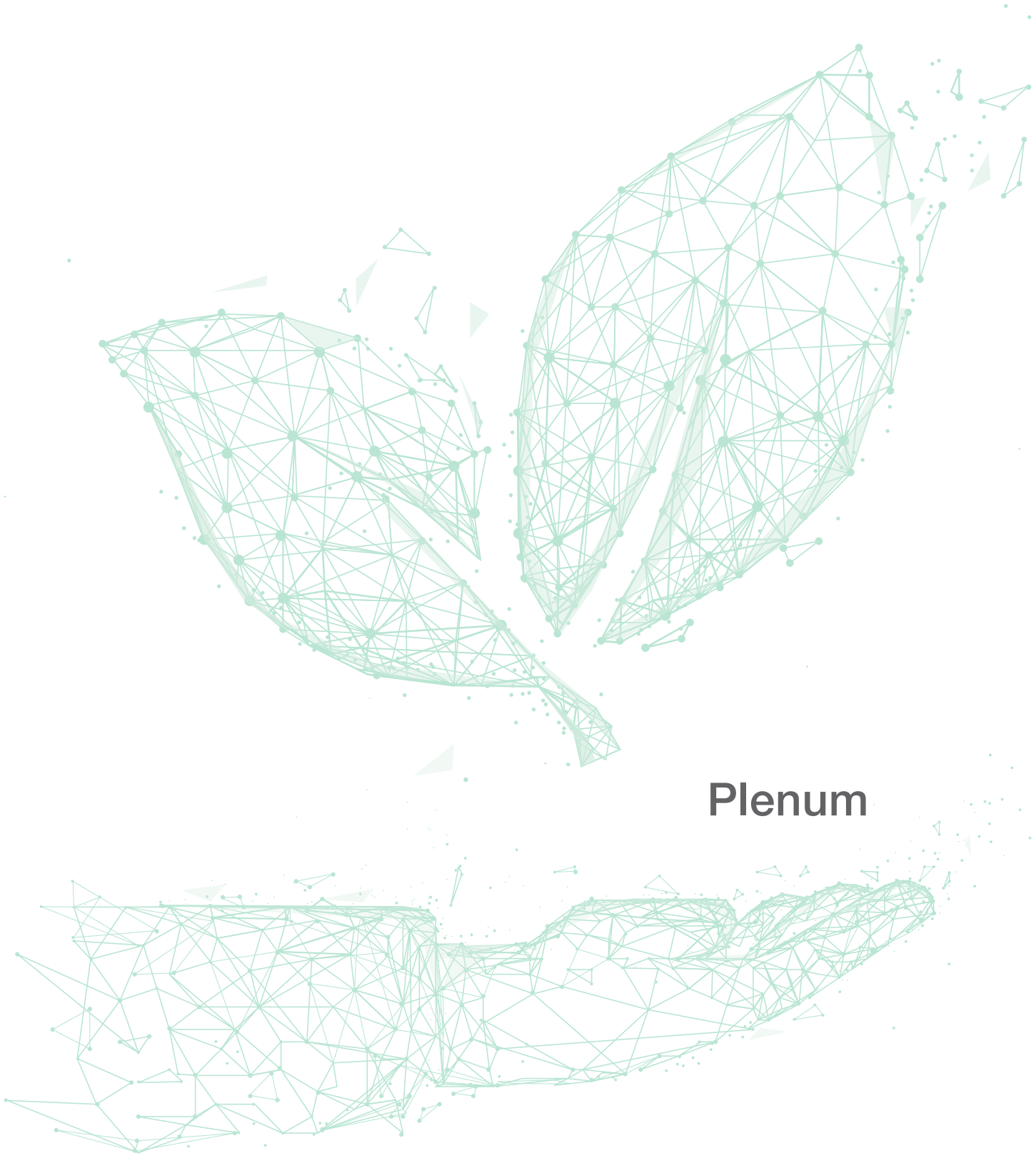
© Campus GmbH/Steindl

Spitzenforschung hautnah – den virutellen 3D-Campus erleben

Digitale Zwillinge werden am Campus auch über die Forschung hinaus genutzt. In der 3D-Umgebung der Maschinenhallen und Labore am WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT können die neun Thementouren virtuell besucht und erlebt werden. Dabei ist die reiche Vielfalt an Forschungs- und Entwicklungsthemen der beiden gastgebenden Institute über das AWK hinaus erfahrbar. Alles unter dem Fokus einer nachhaltigen Produktion.

Digitale Laborführungen:

1. Datengetriebene nachhaltige Fertigung
2. Nachhaltige Fertigung durch die datengetriebene Optimierung von Prozessketten
3. Spüren - Denken - Handeln: Geschlossene Datenkreisläufe für geschlossene Lebenszyklen
4. Produktionsanalytik für Werkzeugmaschinen
5. Innovative Getriebeuntersuchung für eine grüne Produktion
6. Smart Automation Lab
7. Die nächste Generation von Antriebssystemen
8. Digitalisierung als Befähiger für eine grüne Produktion
9. Befähiger für nachhaltige Produktionssysteme



Plenum

Plenarvortrag

Manufacture #LikeABosch – Producing Technology Invented for Life

Dr. Stefan Hartung
Vorsitzender der Geschäftsführung, Robert Bosch GmbH

Geburtsjahr:
1966

Aktuelle Position:

seit 2022	Vorsitzender der Geschäftsführung der Robert Bosch GmbH

Bisherige Positionen:

2019-2021	Vorsitzender des Unternehmensbereichs Mobility Solutions der Robert Bosch GmbH
2013-2019	Geschäftsführer der Robert Bosch GmbH
2009-2013	Vorsitzender des Bereichvorstands, Geschäftsbereich Power Tools der Robert Bosch GmbH

Studium:

1993	Promotion an der RWTH Aachen
bis 1990	Maschinenbau, Fachrichtung Fertigungstechnik an der RWTH Aachen

Manufacture #LikeABosch – Producing Technology Invented for Life

Dr. Stefan Hartung
Vorsitzender der Geschäftsführung, Robert Bosch GmbH

Die fortgeschrittene und hochvolumige Produktion ist das Herzstück unserer Volkswirtschaften, das Ideen und digitale Entwürfe in greifbare Güter für die breite Masse verwandelt.

Für uns reicht dies von der Schaffung winziger Strukturen in spezialisierten Halbleitern über die Herstellung von Elektrowerkzeugen für Millionen von Nutzern und Automobilprodukten für Millionen von Fahrern bis hin zur Bereitstellung von Fertigungstechnologien und -dienstleistungen selbst.

Mit der Umsetzung fortschrittlicher grüner Technologien, nachhaltiger, zirkulärer Ansätze und Resilienzmaßnahmen bieten moderne Produktionsanlagen große Chancen, diese Ziele für Lieferketten und Volkswirtschaften insgesamt zu erreichen.

Daher ist für uns eine qualitativ hochwertige Fertigung ein Eckpfeiler bei der Verwirklichung unseres Ziels der Technologie, die auch für das Leben erfunden wurde.

Plenarvortrag

Circular economy as an industry strategy for sustainable value creation made in Europe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h., Siegfried Russwurm
Präsident, Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.

Geburtsjahr:
1963

Aktuelle Position:

seit 2021	Präsident, Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
seit 2019	Vorsitzender des Aufsichtsrates der thyssenkrupp AG
seit 2019	Vorsitzender des Gesellschafterausschusses und des Aufsichtsrates, Voith GmbH & Co. KGaA

Bisherige Positionen:

2008-2017	Mitglied des Vorstandes & Chief Technology Officer, Siemens AG
1992-2007	verschiedene Führungspositionen, Siemens AG

Studium:

1983-1988	Studium der Fertigungstechnik
1988-1991	Computergestützte Mechanik (PhD)

Circular economy as an industry strategy for sustainable value creation made in Europe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h., Siegfried Russwurm
Präsident, Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.

Wir brauchen eine Kreislaufwirtschaft, um unsere Klimaziele zu erreichen und unsere Rohstoffversorgung zu sichern. Laut dem Circularity Gap Report sind derzeit nur 7,2 Prozent der Weltwirtschaft zirkulär. Unternehmen können jedoch Produkte so gestalten, dass möglichst wenige und vor allem nachhaltige Materialien verwendet werden. Nachhaltige Geschäftsmodelle müssen sich auf Langlebigkeit, Reparierbarkeit und Wiederverwertbarkeit konzentrieren. Wer das Verwertungspotenzial eines Produkts nicht berücksichtigt, verkennt sein volles Wertpotenzial.

Plenarvortrag Co-Host

Autonome Fertigung für eine nachhaltige Zukunft

Paolo Guglielmini
Präsident und CEO, Hexagon

Paolo Guglielmini ist Präsident und CEO von Hexagon, einem weltweit führenden Anbie-ter von Digital-Reality-Lösungen. Guglielmini übernahm diese Rolle im Jahr 2023, nach-dem er zuvor als COO tätig war. Zuvor leitete er als Präsident des Geschäftsbereichs Manufacturing Intelligence von Hexagon die strategische und kommerzielle Entwicklung der Smart Factory Solutions von Hexagon. Seit seinem Eintritt bei Hexagon im Jahr 2010 hat er zahlreiche Schlüsselpositionen innegehabt - von der Strategie und Geschäftsent-wicklung bis hin zu Fusionen und Übernahmen und allgemeinem Management. Bevor er zu Hexagon kam, war Guglielmini bei CERN, dem Europäischen Rat für Kernforschung (in der Schweiz) und bei Accenture (in Italien) tätig. Er besitzt einen Master of Science in Ingenieurwissenschaften und einen Master of Business Administration.

Geburtsjahr:
1977

Derzeitige Position:
seit 2023 Präsident und CEO, Hexagon

Bisherige Positionen:
2022-2023 Chief Operating Officer, Hexagon
2020-2022 Präsident der Manufacturing Intelligence Division, Hexagon
2017-2020 President and CEO, MSC Software (part of Hexagon)
2010-2017 Geschäftsfeldentwicklung, Manufacturing Intelligence Division, Hexagon
2004-2008 Projektleiter, Abteilung Technik, CERN
2003-2008 Wirtschaftsanalytiker, Accenture

Studium:
2009 Master of Business Administration
2002 Master of Science in Engineering

Autonome Fertigung für eine nachhaltige Zukunft

Paolo Guglielmini
Präsident und CEO, Hexagon

Unsere Welt besteht aus endlichen Ressourcen. Um die Umwelt zu schonen, ist es unerlässlich, die Produktlebenszyklen neu zu gestalten und eine wertschöpfende Kreislaufwirtschaft zu schaffen. Wenn Produkte das Ende ihrer Lebensdauer erreichen, können wir viel mehr tun, als nur die Materialien wiederzugewinnen - wir können sie aufarbeiten und aufwerten, um den Produktlebenszyklus zu verlängern und die Energie zu maximieren, die für die Herstellung der Waren überhaupt erst verbraucht wurde. Aber wie können wir sicherstellen, dass Produkte mit Blick auf das Ende ihrer Lebensdauer entwickelt werden, dass sie langlebig sind, wiederverwendet werden können und für eine Aufwertung bereit sind? In diesem Vortrag wird die komplexe Gleichung von Mensch, Technologie und Prozess im Streben nach einer umweltfreundlicheren Produktion untersucht.

Optimierung und Innovation vorantreiben

Die Bewältigung wichtiger Nachhaltigkeitsherausforderungen wie Dekarbonisierung, Abfallverringerung und Ressourcenschutz erfordert eine Konzentration auf Produktivität, Qualität und Effizienz in jeder Phase des Produktlebenszyklus. Um die Herstellung so umweltfreundlich wie möglich zu gestalten, müssen wir alles hinterfragen - von den Produkten, die wir herstellen, über ihre Gestaltung und ihr Aussehen bis hin zu den von uns verwendeten Materialien, ihrer Herstellung und der Art und Weise, wie sie genutzt und gewartet werden.

Die Optimierung von Produktdesign und Produktionsprozessen kann dazu beitragen, Abfall, Energieverbrauch und Emissionen zu reduzieren. Aber Optimierung allein kann den Klimawandel nicht aufhalten - wir müssen auch die Innovation beschleunigen. Die Hersteller müssen innovativ sein und nachhaltige Produktinnovationen auf den Markt bringen - zum Beispiel durch die Herstellung leistungsfähigerer Produkte, die Verwendung der besten verfügbaren Materialien auf möglichst effiziente Weise und die Entwicklung nachhaltigerer Produktionsverfahren.

Menschen mit Technologie befähigen

Durch die Nutzung des vollen Potenzials von Daten ermöglichen Digital-Reality-Lösungen den Herstellern Einblicke, um bessere Produkte auf bessere Weise herzustellen. Sie bringen Innovation und Optimierung zusammen, so dass Nachhaltigkeitsbelange ganzheitlicher angegangen werden können. Effektiv eingesetzt, kann diese Technologie durch fortschrittliche Automatisierung und autonome Technologien ergänzt werden, um die Kraft des menschlichen Einfallsreichtums freizusetzen und funktionsübergreifende

Teams in die Lage zu versetzen, zusammenzuarbeiten, Probleme zu lösen, schneller zu iterieren und komplexe, aber dringende Nachhaltigkeitsprobleme schneller anzugehen.

Jetzt ist die Zeit für neue Ideen und größere Ambitionen. Um eine skalierbare Nachhaltigkeit zu erreichen, müssen die Hersteller den Menschen die Daten an die Hand geben, die sie benötigen, um während des gesamten Produktlebenszyklus fundierte Entscheidungen zu treffen.

Die Digitalisierung des Produktlebenszyklus

Ein datengesteuerter Ansatz während des gesamten Produktlebenszyklus ist ein Konzept für eine umweltfreundlichere Produktion. Der Einsatz digitaler Tools zum Aufbrechen von Silos und zur Förderung der Zusammenarbeit ermöglicht es Produktentwicklern, Nachhaltigkeitsthemen vom Designkonzept bis zur Auslieferung ganzheitlicher zu betrachten und bessere Entscheidungen zu treffen, die mit der Zeit zu einem nachhaltigeren Produktionssystem führen werden.

Im Design - Da schätzungsweise 80 % der Umweltauswirkungen eines Produkts bereits in der Designphase festgelegt werden, ist es wichtig, dass die Entwicklungsteams über möglichst viele Informationen verfügen, um Entscheidungen über Materialien, Prozesse, den Zweck des Produkts und die erforderliche Leistung zu treffen. Das Verständnis des Nutzungszyklus und des Verbraucherverhaltens liefert wertvolle Erkenntnisse, ebenso wie Daten aus den Produktions- und Qualitätssicherungsprozessen früherer Iterationen. Die Fähigkeit, die Folgen von Entscheidungen in der digitalen Realität zu verstehen und Ideen zu testen, kann die Erstellung von Prototypen reduzieren und die Herstellbarkeit und Qualität sicherstellen. Die effektive Nutzung von Daten im Designprozess öffnet auch die Tür zu nachhaltigem Design und Ökodesign-Ansätzen, die eine vorausschauende Wartung, wertsteigernde Upgrades, einfache Demontage, Wiederaufbereitung und Recycling unterstützen.

In der Produktion - Digital Reality-Lösungen ermöglichen die Prozesssimulation und -validierung und optimieren die Produktion, um Ressourcen zu sparen und den Ausschuss zu verringern, indem Nacharbeit und Ausschuss reduziert werden. Die Annäherung des Herstellungsprozesses an die Entwurfsphase durch kontinuierliches digitales Feedback trägt dazu bei, optimierte Produkte auf optimierte Weise zu erstellen, die die Entwurfsabsicht beibehalten. Die zunehmend geschlossene Automatisierung trägt dazu bei, das Potenzial menschlicher Fehler in den Prozessen zu beseitigen und häufige Probleme wie den Werkzeugverschleiß zu mindern, so dass die Produktion näher an das "First Time Right" heranrückt.

Qualitätskontrolle und Lebensdauer - Messlösungen erfassen Daten aus der realen Welt, die üblicherweise für die Qualitätssicherung verwendet werden, doch ihr Potenzial ist viel größer. Die Rückführung von Messdaten in Konstruktionssimulationen kann das Verständnis des Konstrukteurs für die Auswirkungen des Fertigungsprozesses oder für das Verhalten des Teils während des Betriebs verbessern und so Erkenntnisse über den Nutzungszyklus liefern, die die Messlatte für künftige Entwicklungen höher legen.

Die Digitalisierung von Produkten während ihres gesamten Lebenszyklus bietet auch die Möglichkeit, digitale Produktpässe einzuführen. Mit den in die Produkte eingebetteten digitalen Informationen gewinnen die Hersteller an Transparenz, um die Nachhaltigkeit der Produkte während ihres Lebenszyklus zu verbessern, indem sie Informationen darüber sammeln und weitergeben, wie sie repariert, zerlegt oder recycelt werden können.

Die Macht der Daten nutzen

Daten sind der Schlüssel zu skalierbarer Nachhaltigkeit, aber sie werden den Weg zu einer umweltfreundlicheren Produktherstellung nur dann beschleunigen, wenn sie den richtigen Leuten zur richtigen Zeit vollständig zugänglich sind. Siloartige Werkzeuge und starre Systeme behindern die Innovation. Um dies zu ändern, müssen die Hersteller Daten aus verschiedenen Anwendungen miteinander verbinden, um Arbeitsabläufe zu gestalten und Probleme zu lösen. Die zentrale Verknüpfung dieser Daten über die Cloud-Technologie kann fortschrittliche Erkenntnisse liefern und eine intelligente Automatisierung ermöglichen, während gleichzeitig KI- und maschinelle Lerntechniken eingesetzt werden, um riesige Datenmengen autonom nutzbar und für menschliche Experten verwertbar zu machen. Nur so können funktionsübergreifende Teams Daten in vollem Umfang nutzen, interagieren und sich austauschen wie nie zuvor, ihre Ideen schneller umsetzen und bessere Produkte auf neue, innovative Weise herstellen.

HEXAGON
AREA 12

Make the difference

Let’s rethink making. Let’s shape a better future.

Securing the future for people and planet requires more than a rethink – we need to reinvent making.

This isn’t about improving what exists, it’s about rethinking everything we know about products and production. Hexagon technology empowers makers with the tools to create optimised products in new innovative ways – from concept design and material selection to simulation and production.

Dream the impossible and redefine what’s real. Let’s create the change we need to see. Together.

Empowering green production

Let’s shape tomorrow, today

Makers shape our world. Define the way we live. Constantly strive for improvement. With a climate emergency staring humanity in the face – makers can make the difference.

Hexagon exists to empower makers to shape a better future – collaborating with designers, inventors, engineers, researchers and manufacturers, and providing the tools to unlock innovation and solve challenges.

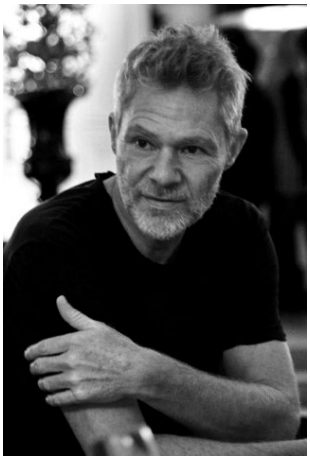
Through efficient design, material selection, process, production and end-of-life planning, we can conserve energy, resources, money and time – taking manufacturing from problem to solution.

The innovation imperative

An opportunity exists, not simply to slow climate change, but to turn the tide. It is time for new ideas and bigger ambition.

Makers that place their focus on optimising what exists will lose out to innovators who rethink every aspect of products and production – disrupting the status quo with solutions that realign people with planet.

It’s time to swap resources, energy and consumption for data, technology and innovation. It’s time to give wings to your ideas.



Plenarvortrag

Beyond sustainability – Manufacturing a new mindset

Stefan Liske
Managing Director, PCH Innovations

Geburtsjahr:
1966

Aktuelle Position:

seit 2019	Blank.AI, Gründer + Partner
seit 2006	PCH Innovations, Gründer + Partner

Bisherige Positionen:

2003-2006	VW Gruppe Direktor Globale Produktstrategie & Innovationsprojekte
2000-2003	Arthur D. Little, Partner
1988-2000	BMW Group, Manager Entwicklung & Design Sonderfahrzeuge

Studium:

bis 1993	Dipl.-Ing. Industrial Design, TU München
bis 1993	Dipl.-Ing. Mechanical Engineering, TU München
bis 1990	MBA, Thunderbird School of Global Management

Beyond sustainability – Manufacturing a new mindset

Stefan Liske
Managing Director, PCH Innovations

Die nachhaltige Umgestaltung von Produktionssystemen erfordert v.a. auch einen kulturellen und technologischen Wandel auf allen Unternehmensebenen. Es geht nicht nur um Maschinen und Prozesse, es geht um Menschen. Ohne den entsprechenden Kultur- und Bewusstseinswandel werden wir auch technisch und prozessual nur marginale Verbesserungen erzielen, während die Entfremdung zwischen den Menschen, Mensch & Technologie und auch die Entfremdung in uns weiter zunimmt. Unser Innovations-Framework konzentriert sich deshalb v.a. auf die harmonische Beziehung zwischen Mensch und Maschine. Dieses Framework besteht aus drei Modulen: **Mindset, Organisation und Technologie.**

Das Modul Innovation **Mindset** erforscht Praktiken, wie wir ein tieferes Bewusstsein für fürsorgliche, vernetzte und letztlichendlich auch heilende Zustände in die Gestaltung von Produktionssystemen einbringen können. Dabei gilt es z.B. die Balance zwischen künstlicher und unserer menschlichen, natürlichen Intelligenz zu halten.

Das Modul **Organisation** verknüpft die den Bewusstseinswandel mit neu entstehenden Produktionsökosystemen, die den Fluss in Netzwerken höher priorisieren als reine Transaktionsaspekte. Es unterstreicht dabei die Notwendigkeit für lokal nahe und ferne Produktionskapazitäten, als auch für offene und anpassungsfähige Fertigungssysteme, und dem Aufbau von Ausbildungsplattformen und Produktionsgemeinschaften Raum zu geben. Das Vortragsmodul geht sogar so weit Produktions- und ganze Supply Chain Systeme in sogenannte "Manufacturing Biomes" umzugestalten.

Das dritte Vortragsmodul konzentriert sich auf konkrete Beispiele und Konzepte für **Technologie**anwendungen, die diesen Bewusstseinswandel und damit eine neue Harmonie zwischen Mensch und Technologie integrieren. Es werden vier Automatisierungsaspekte besprochen: Design-to-Make-Software-Pipelines, additive Fertigung, zirkuläre Robotik und generative KI.

Der Vortrag von PCH Innovations wird eine Fülle von operativen Erkenntnissen, Forschungskonzepten und konkreten Fallbeispielen aus der Arbeit des kreativen Ingenieurbüro für Forschungstechnologien aus Berlin liefern.

Plenarvortrag

Transformation of the steel industry – how to save 2.5% of German CO2 emissions

Dr. Marie Jaroni,
Head of Decarbonization, thyssenkrupp Steel Europe AG

Geburtsjahr:
1984

Aktuelle Position:

seit 2021	Leiterin des Centers of Decarbonization bei thyssenkrupp Steel Europe AG
seit 2021	Mitglied des Aufsichtsrates der Eisen- und Hüttenwerke AG

Bisherige Positionen:

2017-2021	thyssenkrupp Steel Europe AG
2011-2017	McKinsey & Company

Studium:

2016	Promotion an der RWTH Aachen
bis 2011	Studium der Metallurgie und Werkstofftechnik an der RWTH Aachen

Transformation of the steel industry – how to save 2.5% of German CO2 emissions

Dr. Marie Jaroni,
Head of Decarbonization, thyssenkrupp Steel Europe AG

tkH2Steel®: Mit Wasserstoff zum kohlenstoffneutralen Stahl

Die Stahlproduktion bei thyssenkrupp soll bis 2045 Klimaneutralität erreichen. Mit unserer Klimastrategie verstärken wir unsere bisherigen Aktivitäten zur Emissionsminderung, nehmen unsere gesellschaftliche Verantwortung wahr und bekennen uns zum Pariser Klimaabkommen von 2015. Als erstes Ziel für 2030 strebt thyssenkrupp Steel an, die Emissionen aus der eigenen Produktion und den Prozessen sowie aus dem Einkauf von Energie um mehr als 30 Prozent gegenüber dem Basisjahr 2018 zu reduzieren.

Dabei verfolgt thyssenkrupp Steel einen technologieoffenen Ansatz und setzt auf zwei parallele Wege: Der entscheidende Schritt ist die Vermeidung von CO2 durch den Einsatz von Wasserstoff ("Carbon Direct Avoidance", CDA). Ergänzt wird dies durch die Nutzung von CO2, das bei der Stahlerzeugung entsteht (Carbon Capture and Usage", CCU).

Thyssenkrupp Steel entwickelt beide Wege kontinuierlich weiter. Das Unternehmen sucht stets nach noch effizienteren Lösungen oder nach Möglichkeiten, die Transformation zu beschleunigen, zum Beispiel durch neue technologische Erkenntnisse. Auf dem Weg zum Wasserstoff hat thyssenkrupp Steel auch immer ein Auge auf die Verfügbarkeit von Wasserstoff, denn die Wasserstoffwirtschaft steckt noch in den Kinderschuhen. Um den schnellen Aufbau einer Versorgungsinfrastruktur für grünen Wasserstoff zu forcieren, ist thyssenkrupp Steel Partner in verschiedenen nationalen und internationalen Projekten und Kooperationen.

Der erste Technologiepfad beinhaltet den sukzessiven Abschied vom Hochofen

Im Gegensatz zum Hochofen wird in DR-Anlagen kein Roheisen, sondern fester Eisenschwamm ("Direct Reduced Iron", DRI) erzeugt. Bis 2026 werden wir die erste Anlage mit einer Kapazität von 2,5 Millionen Tonnen bauen. Allein dadurch werden 3,5 Millionen Tonnen CO2 eingespart, was etwa 20 Prozent unserer Gesamtemissionen entspricht. Bis 2030 wollen wir 5 Millionen Tonnen CO2-reduzierten Stahl produzieren und die CO2-Emissionen um mehr als 30 Prozent senken. Die Stahlproduktion von thyssenkrupp Steel soll bis 2045 komplett klimaneutral sein.

Es muss zu einem rohmetallähnlichen Produkt eingeschmolzen werden, damit es zu hochwertigem Stahl weiterverarbeitet werden kann. Gemeinsam mit Anlagenbauern hat thyssenkrupp Steel deshalb eine völlig neue Anlage entwickelt, um das Roheisen-System zu optimieren. Es handelt sich dabei um eine elektrisch betriebene Schmelzwanne, die mit der DR-Anlage kombiniert wird. Direktreduktionsanlagen mit einer Schmelzwanne erzeugen - ähnlich wie ein Hochofen - kontinuierlich ein flüssiges Produkt, das mit konventionell erzeugtem Roheisen vergleichbar ist.

Dadurch können die neuen Anlagen nahtlos in das bestehende Hüttenwerk integriert werden. Der große Vorteil ist, dass die bestehenden und bewährten Prozesse in den Duisburger BOF-Schmelzbetrieben beibehalten werden können. Das flüssige Produkt wird dort zu den bewährten Stahlsorten verarbeitet. So wird im Duisburger Stahlwerk weiterhin Stahl gekocht wie bisher - allerdings mit Wasserstoff und Ökostrom statt Kohle.

Der zweite technologische Weg, den thyssenkrupp Steel um bis 2045 klimaneutral zu werden, ist das Projekt Carbon2Chem®.

Im Rahmen eines von der Bundesregierung geförderten Projekts bereitet thyssenkrupp Steel seit 2018 Prozessgase aus der Stahlproduktion auf und verarbeitet sie zu Grundprodukten für die chemische Industrie. Auf diese Weise kann Synthesegas eingespart werden, das bisher aus fossilen Ressourcen wie Erdöl oder Erdgas gewonnen wird. Auf einer Testanlage in der Nähe des Hüttenwerks recycelt das Unternehmen Prozessgase, die bei der Stahlproduktion entstehen, und bereitet sie weiter auf. Mit dem neuen Verfahren hat thyssenkrupp Steel weltweit zum ersten Mal Ammoniak und Methanol aus Hüttengasen hergestellt. Die Grundchemikalien werden in der chemischen Wertschöpfungskette weiterverarbeitet, zum Beispiel zu Düngemitteln, Kunststoffen oder Kraftstoffen.

Durch den parallelen Einsatz beider Verfahren - Carbon2Chem® und die Einspeisung von Wasserstoff als Reduktionsmittel - kann thyssenkrupp die Emissionen der bestehenden Hochofenroute künftig deutlich reduzieren.

Plenarvortrag Co-Host

Wie 5G eine nachhaltige Produktion durch Lösen der Energiekurve ermöglicht

Joe Wilke
VP, Head of Center of Excellence 5G Industry 4.0, Ericsson

Geburtsjahr:
1967

Aktuelle Position:

Seit 2019	VP, Head of Center of Excellence 5G Industry 4.0, Ericsson Deutschland

Bisherige Positionen:

2016-2018	Program Manager „5G beyond Mobile Broadband“, Ericsson Schweden
2012-2016	Program Manager „Software Defined Networking“, Ericsson Deutschland
2010-2011	VP, Technology, Ericsson Silicon Valley (USA)
1994-2010	Technology Transformation Programs, Ericsson Deutschland
1994-1994	Operations Engineer, e-plus Mobilfunk

Studium:

bis 2011	Studium (Dipl.-Wirt.-Ing.) Wirtschaftsingenieurwesen, Fernuni Hagen
bis 1994	Studium (Dipl.-Ing.) Elektrotechnik RWTH Aachen

Wie 5G eine nachhaltige Produktion durch Lösen der Energiekurve ermöglicht

Joe Wilke
VP, Head of Center of Excellence 5G Industry 4.0, Ericsson

Alle Bereiche der Gesellschaft müssen zusammenarbeiten, um die globalen Herausforderungen rund um Klima und Energie zu meistern. Net Zero steht im Zentrum des Klimaschutzes und ist für die Industrie von zentraler Bedeutung. Zum Beispiel bedeutet die Einführung neuer Netzwerkgenerationen in der elekommunikationsbranche in der Regel einen höheren Energieverbrauch. Wenn 5G in ähnlicher Weise wie 3G und 4G eingeführt würde, würde der Energieverbrauch stark ansteigen. Daher ist es von größter Bedeutung, die Energiekurve von Mobilfunknetzen zu durchbrechen, was zu einer Verringerung des Energieverbrauchs, der Kosten und der Umweltauswirkungen führt. Auf der Grundlage umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten kann dies erreicht werden durch 1) den intelligenten Betrieb der Standortinfrastruktur mit künstlicher Intelligenz, 2) den präzisen Aufbau von 5G und 3) die Implementierung energiesparender Software in der Radioausrüstung. Darüber hinaus sollte der Lebenszyklus der Netzwerkhardware einem zirkulären Ansatz folgen, bei dem die Komponenten aus nachhaltigen Materialien hergestellt werden und sowohl Wiederverwendung als auch Recycling erleichtern.

Eine nachhaltige, klimafreundliche Produktion ist auch in den meisten anderen Branchen Priorität, mit dem Ziel, den CO2-Fußabdruck und die Umweltauswirkungen zu verringern. Neben dem wichtigen Beitrag zu nachhaltigen Entwicklungszielen kann die Industrie durch Investitionen in grüne Lösungen auch wirtschaftliche Gewinne erzielen. In produzierenden Unternehmen kann dies durch die Überwachung der Produktion mit Hilfe von Sensoren und die Ableitung von Optimierungspotenzialen in Prozessen erreicht werden, die zu einem geringeren Energieverbrauch und zur Reduzierung von Ausschuss und Nacharbeit führen. Die kontinuierliche Überwachung macht den Status kritischer, hochwertiger Anlagen und Prozesse in Echtzeit sichtbar und ermöglicht eine schnelle Reaktion auf potenzielle Gefahrensituationen. Außerdem kann eine Maschinenwartung proaktiv statt reaktiv durchgeführt werden, also nicht erst, wenn bereits eine stilllegende Störung der Maschine aufgetreten ist. Der Betrieb von autonomen Robotern wird durch die Live-Aufzeichnung ihrer Standorte und Routen optimiert, wodurch Kollisionen und unnötige Abbremsungen vermieden werden, was die Lebensdauer der Batterien verlängert.

Diese Art der Echtzeitüberwachung erfordert eine Konnektivitätsinfrastruktur, die sowohl Flexibilität und Kontinuität in der Produktion als auch die zuverlässige Übertragung großer Datenmengen gewährleistet - wesentliche Merkmale von 5G. 5G ist eine Plattform,

die den Aufbau von cyber-physischen Systemen mit einer geschlossenen Feedbackschleife ermöglicht - beginnend mit der Erfassung von Live-Produktionsdaten durch verschiedene Arten von Sensoren im physischen Produktionsbereich, die dann im virtuellen Datenraum analysiert werden. Dies wird durch künstliche Intelligenz unterstützt und führt schließlich zur automatischen Ableitung von Maßnahmen für die Anlagen in der realen Umgebung.

In dieser Keynote werden wir untersuchen, wie 5G automatisierte und vernetzte Fabriken ermöglicht und dazu beiträgt, Umweltauswirkungen zu reduzieren und gleichzeitig wirtschaftlich von einem geringeren Ressourcenverbrauch zu profitieren.

Intelligente Fertigung

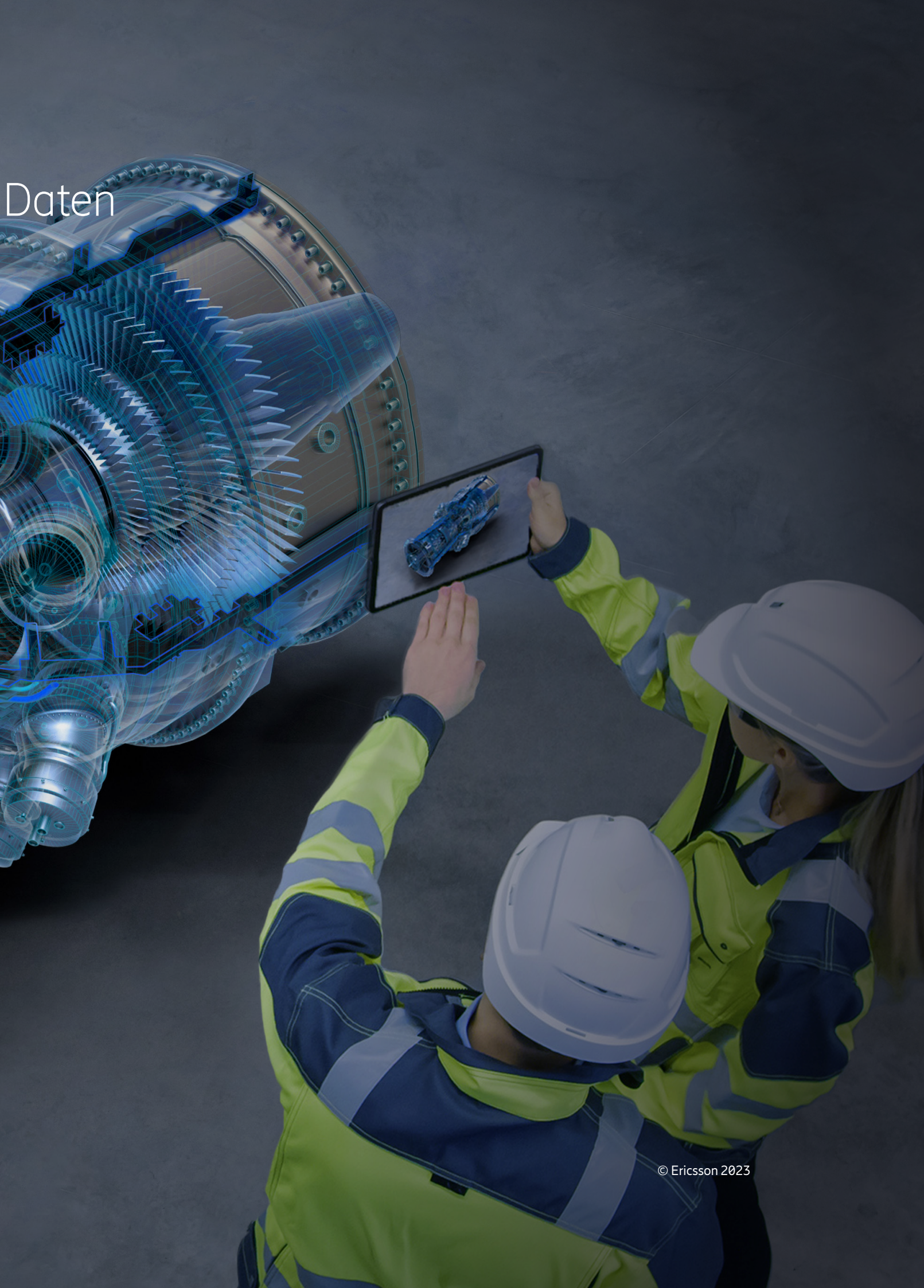
Vernetzung von Maschinen, Menschen und

Eine intelligente Fertigung maximiert die Produktivität, minimiert die Kosten und gewährleistet die Sicherheit Ihrer Mitarbeiter - alles durch ein sicheres, intelligent verbundenes Netz. Mit Ericsson Private Netzwerklösungen schaffen wir die Möglichkeiten einer völlig neuen Vernetzung.

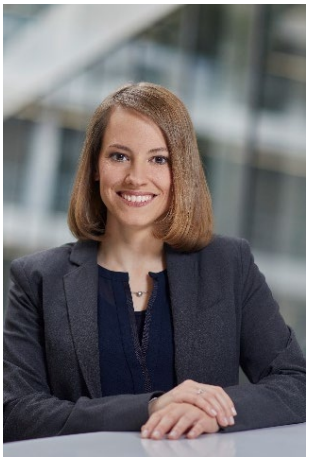
ericsson.com/manufacturing

ERICSSON

Daten



© Ericsson 2023



Plenarvortrag Co-Host

Transformation der Industrie durch das industrielle Metaverse: ein Katalysator für Nachhaltigkeit

Dr. Annika Hauptvogel
Head of Technology and Innovation Management, Siemens AG

Dr. Annika Hauptvogel leitet seit Juni 2021 das Technology and Innovation Management bei Siemens. In dieser Funktion ist sie verantwortlich für die Strategie der zentralen, konzerneigenen Forschungseinheit von Siemens und berichtet direkt an den CTO der Siemens AG.

Dr. Annika Hauptvogel begann ihre Laufbahn 2015 bei Siemens Mobility. Dort war sie zunächst in der Strategie tätig, ehe sie dann für die Entwicklung digitaler Services für Bahnsysteme verantwortlich war.

Dr. Annika Hauptvogel studierte Maschinenwesen an der Technischen Universität München mit der Vertiefung Regelungstechnik und Produktionsmanagement. Anschließend promovierte sie am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen im Bereich cyber-physischer Feinplanung.

Geburtsjahr:
1987

Aktuelle Position:

seit 2021	Head of Technology and Innovation Management, Siemens AG

Bisherige Positionen:

2017-2021	Head of Service Engineering Rail Infrastructure, Siemens Mobility GmbH
2015-2017	Referentin der Geschäftsleitung, Siemens AG
2013-2015	Gruppenleiterin Produktionslogistik, WZL der RWTH Aachen
2011-2013	Projektleiterin/ Wissenschaftliche Mitarbeiterin, WZL der RWTH Aachen

Studium:

2015	Promotion zum Dr.-Ing. am Werkzeugmaschinenlabor, RWTH Aachen
bis 2011	Diplomstudiengang Maschinenwesen, TU München

Transformation der Industrie durch das industrielle Metaverse: ein Katalysator für Nachhaltigkeit

Dr. Annika Hauptvogel
Head of Technology and Innovation Management, Siemens AG

Die Welt steht vor wachsenden ökologischen Herausforderungen, die unter anderem durch CO2-Emissionen verursacht werden. Die Industrie ist für 20 % der weltweiten CO2-Emissionen und mehr als 30 % des weltweiten Energieverbrauchs verantwortlich. Daher steht die Industrie heute vor der Herausforderung, beides zu reduzieren. Das industrielle Metaverse wird eine wichtige Rolle bei der Bewältigung dieser Herausforderungen spielen.

Das industrielle Metaverse ist das Konzept einer virtuellen Welt, die reale Maschinen und Fabriken widerspiegelt und simuliert. Es wird eine Welt sein, die immer in Betrieb ist, die die Interaktion einer unendlichen Anzahl von Menschen und Anlagen ermöglicht und ein vollständiges Eintauchen in eine physikbasierte, fotorealistische Echtzeitsimulation bietet. In dieser digitalen Umgebung können Menschen die Barrieren der Entfernung überwinden und über Länder und Kontinente hinweg zusammenarbeiten, was eine völlig neue Ebene der Zusammenarbeit ermöglicht. Probleme können schnell gefunden, analysiert und behoben werden - oder sogar entdeckt werden, bevor sie entstehen. Unternehmen und Volkswirtschaften werden in der Lage sein, nachhaltiger zu werden, indem sie die Dekarbonisierung und Dematerialisierung beim Produktdesigns, ihrer Prozesse und der Produktion vorantreiben.

Das industrielle Metaverse ist noch eine Vision, aber sie wird mit Technologien realisiert, die schon heute existieren. Digitale Zwillinge sind wichtige Bausteine für das industrielle Metaversum. Die Kombination verschiedener Technologien wie Künstliche Intelligenz, 5G/6G, Blockchain, Edge- und Cloud-Computing sowie Augmented und Virtual Reality wird die reale und die digitale Welt noch stärker miteinander verbinden.

Das Industrial Metaverse wird eine nachhaltige Industrie ermöglichen, indem Energie gespart, die Effizienz gesteigert und Abfälle in allen Phasen des Produktlebenszyklus reduziert wird- was anhand verschiedener Anwendungsfälle von Design & Engineering über Produktion bis hin zu Betrieb & Service gezeigt werden kann. Alle diese Anwendungsfälle sind miteinander verbunden und tauschen kontinuierlich Daten zwischen der physischen und der digitalen Welt aus.

Während der Entwurfsphase ermöglicht das Industrial Metaverse eine engere Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten, wobei auch nicht-technische Akteure in den Prozess einbezogen werden. Dies fördert die Demokratisierung von Simulationen und ermöglicht es

Experten, effektiver mit Nicht-Experten zu kommunizieren. Daher wird es möglich sein, Entwürfe und Fertigungsoptionen interaktiver zu erforschen und mehr Standpunkte einzubeziehen, um bessere, widerstandsfähigere Produkte zu schaffen. Der gesamte Prozess wird effizienter, und durch das Ausprobieren verschiedener Szenarien in einer virtuellen Umgebung, bevor sie in der Realität gebaut werden, wird Material eingespart und Abfall reduziert.

Ein wichtiger Anwendungsfall in der Produktionsphase wird die virtuelle Inbetriebnahme von Fabriken sein: die virtuelle Installation und Erprobung neuer Geräte und Software ohne Störung der laufenden Produktionslinie. Das industrielle Metaversum wird es ermöglichen, die neuen Geräte in der Fabrik mit Augmented-Reality-Technologien (AR) zu visualisieren und die Interaktion mit den bestehenden Produktionsanlagen zu simulieren. Fachleute aus der Industrie werden in Echtzeit zusammenarbeiten, Probleme beheben, bevor sie in der realen Welt auftreten, und neue, innovative Lösungen entwickeln, die gefährliche Situationen verhindern und die Sicherheit der Mitarbeiter erhöhen können. Sie wird die Art und Weise, wie wir zusammenarbeiten, für immer verändern - innerhalb von Organisationen, Ökosystemen und zwischen Unternehmen und ihren Kunden und Auftraggebern - und zu einem wichtigen Wegbereiter der Industrie 4.0 werden. Sie wird es ermöglichen, mehr in der virtuellen Welt mit weniger Ressourcen aus der realen Welt zu testen. So können belastbare Fabriken in einer virtuellen Umgebung modelliert und optimiert werden, was den Bedarf an physischen Tests und Experimenten verringert. Diese Fabriken werden sich auf künstliche Intelligenz und Algorithmen des maschinellen Lernens stützen, um Produktionsprozesse zu optimieren, Ausfallzeiten zu verringern und Verschwendung zu minimieren.

Für den Betrieb ermöglicht das industrielle Metaverse nicht nur die virtuelle Schulung der Mitarbeiter in ungewöhnlichen Szenarien, einschließlich des Zugangs zu virtuellen Experten in großem Maßstab, sondern auch die Visualisierung von Daten und die Erweiterung von Informationen (z. B. virtuelle Sensoren) im Zusammenhang mit der physischen Anlage durch AR-Technologie mithilfe einer Brille oder eines Tablets.

Das industrielle Metaverse wird die Industrie verändern und Nachhaltigkeit ermöglichen. Durch den Einsatz dieser Technologie können wir nachhaltigere und effizientere industrielle Systeme schaffen, Abfälle reduzieren und die Grundsätze der Kreislaufwirtschaft fördern. Insgesamt ist es ein Katalysator für den Aufbau einer widerstandsfähigeren, kreislauforientierten und nachhaltigen Zukunft.

Digitale Industrien sind nachhaltige Industrien...

Unsere Ressourcen sind endlich, aber Daten sind es nicht. Digitalisierung und Automatisierung sind die entscheidenden Faktoren, um die Herausforderungen von heute und morgen zu meistern. Es gilt keine Zeit zu verlieren: Werden Sie ein digitales Unternehmen mit Hilfe unserer digitalen Geschäftsplattform Siemens Xcelerator. Unser digitales Unternehmensportfolio steigert die Flexibilität, Transparenz und Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungskette mit innovativen Motion Control und Fabrikautomatisierungslösungen.

SIEMENS

… Nachhaltige Industrien, die weiter wachsen

Machen Sie Ihre Nachhaltigkeitsziele umsetzbar und fördern Sie gleichzeitig Wachstum und Rentabilität. Es ist an der Zeit, anzufangen und nachhaltige Innovationen in die Tat umzusetzen. Wir helfen unseren Kunden, ihre Nachhaltigkeitsziele zu erreichen, und verpflichten uns gleichzeitig, unseren eigenen CO_2-Fußabdruck bis 2030 auf Null zu reduzieren.

Plenarvortrag

Investing in the Technology Champions of Tomorrow

Dr. Elisabeth Schrey
Geschäftsführerin des DeepTech & Climate Fonds

Geburtsjahr:
1989

Aktuelle Position:

seit 2023	Geschäftsführung des DeepTech & Climate Fonds

Bisherige Positionen:

Seit 2023	Geschäftsführung des DeepTech & Climate Fonds, Öffentlicher Fonds mit bis zu Eur 1 Mrd. Volumen für Technologieunternehmen in der frühen Wachstumsphase
2020-2023	Principal bei btov Partners' Industrial Technology Fund, Privater Fonds mit Eur 100 Mio. Volumen für Europäische Startups aus dem Bereich Industrietechnologie
2017-2020	Investmentmanager beim TechVision Fonds in Aachen, Privater Fonds mit Eur 55 Mio. Volumen für frühphasige Technologieunternehmen der Regionen Aachen, Köln, Duisburg

Studium:

2017	Promotion im Innovationsmanagement am WZL der RWTH Aachen
bis 2013	Bsc. und Msc. Im Wirtschaftsingenieurwesen mit der Fachrichtung Maschinenbau an der RWTH Aachen

Investing in the Technology Champions of Tomorrow

Dr. Elisabeth Schrey
Geschäftsführerin des DeepTech & Climate Fonds

Viele junge Unternehmer:innen widmen sich den Herausforderungen unserer Gesellschaft und Wirtschaft. Insbesondere Unternehmen mit disruptiven Technologien oder neuen ressourcenschonenden Geschäftsmodellen haben längere Kommerzialisierungszyklen und einen größeren Kapitalbedarf.

Investments in solche Unternehmen befähigen eine schnelle Transformation in eine ressourcenschonende und klimaneutrale Wirtschaft. Diese Transformation ist mit Unsicherheit und Risiko behaftet, gleichzeitig auch die größte Chance unserer Wirtschaft.

Wir möchten mit langfristigem Wachstumskapital dazu beitragen, dass sich in Deutschland und Europa wirtschaftlich erfolgreiche und eigenständige Technologieunternehmen entwickeln.

Session 1

Data structures for resilience

1.1 Datenstrukturen für eine resiliente Life Cycle Sustainability

R. H. Schmitt, M. Bodenbenner, H. Brings, B. Montavon

Gliederung

1 Motivation 40

2 Daten als Enabler der Life Cycle Sustainability 41
2.1 Life Cycle Sustainability – Definition und Zielsetzung 41
2.2 Datengetriebene Nachhaltigkeitsstrategien und -bewertung 42

3 Resilientes Produktionsdatenmanagement 44
3.1 Resilienz – Definition und Herausforderungen 44
3.2 FAIR Data und FACT Algorithms 46
3.3 Von FAIR und FACT zu Produktionsdatenmanagement 48

4 Datenstrukturen und technologische Lösungsbausteine 50
4.1 5G als Infrastruktur (Vernetzte Ressourcen) 51
4.2 Domänenadaptierte Datenstrukturen (Daten) 52
4.3 Von Daten- zu Informationsmanagement mittels Kontextualisierung (Informationen) 53
4.4 Der Digitale Zwilling als Automatisierungsvehikel (Wissen) 55
4.5 Nachhaltigkeits- und Qualitätsmanagement als Synergie (Aktion) 56

5 Ausblick 57

6 Literatur 59

doi: 10.24406/publica-958

Kurzfassung

Datenstrukturen für eine resiliente Life Cycle Sustainability

Die Perspektive der Life Cycle Sustainability von morgen vereinigt die Megatrends Nachhaltigkeit, Digitalisierung und Resilienz unter den Rahmenbedingungen eines verantwortungsvollen Umgangs mit Ressourcen. Die Betrachtung definierter Nachhaltigkeitskriterien für ein Produkt und seine Komponenten über mehrere Lebenszyklen mit dem Ziel des Werterhalts oder der Wertsteigerung, fokussiert diese drei Megatrends auf das notwendige Datenmanagement. Die Daten bestimmen den technologischen Gestaltungsspielraum und ermöglichen eine objektive Bewertung. Die effektive Nutzung bereits existierender Bausteine wie Smart Sensors, Digital Twins, Cyber Physical Systems, intelligente Algorithmen zur Mustererkennung und Entscheidungsfindung und andere sind durch die notwendige fortschrittliche Kommunikation in Bezug auf Geschwindigkeit, Latenz und Jitter zu ergänzen. Der Zeithorizont der Life Cycle Sustainability sowie die a priori gegebenenfalls unbekannte Nutzung der Daten führen zu weiteren Herausforderungen: Diese müssen über Produktions- und Nutzerzyklen hinaus für einen langen Zeitraum und für viele Stakeholder zuverlässig auffindbar, zugänglich, interoperabel und wiederverwendbar sein, selbst wenn zwischen der Datenerhebung und der Datennutzung mehrere Jahrzehnte, vielzählige Dateneigner sowie mehrfache Systembrüche liegen. Die FAIR- und FACT- Prinzipien bieten einen geeigneten Rahmen, sofern Sie auf die Domäne der Produktionstechnik zugeschnitten werden, um wirtschaftlich erfolgreiche zirkuläre Wertschöpfung zu ermöglichen. Hierfür wird im Beitrag ein Ansatz vorgestellt und anhand verschiedener Beispiele aus den Bereichen 5G, Sensordatenmanagement, Automatisierung, und Qualitätsmanagement illustriert.

Schlagwörter: Datenmanagement, Resilienz, Sensing, Nachhaltigkeit

Abstract

Data Structures for Resilience in Life Cycle Sustainability

The perspective of tomorrow's life cycle sustainability combines the megatrends of sustainability, digitalisation and resilience under the boundary conditions of responsible use of resources. The cross-life cycle consideration of defined sustainability criteria for a product and its components with the aim of maintaining or increasing value focuses these three megatrends on the necessary data management. The data determine the technological scope and enable an objective evaluation. The effective use of already existing building blocks such as smart sensors, digital twins, cyber physical systems, intelligent algorithms for pattern recognition and decision making and others need to be complemented by the necessary advanced communication in terms of speed, latency and jitter. The temporal horizon of life cycle sustainability and the a priori unknown use of data lead to further challenges: Beyond production and user cycles, data must be reliably findable, accessible, interoperable and reusable for a long period of time and for many stakeholders, even if there are several decades, numerous data owners and multiple system breaks between data collection and data use. The FAIR and FACT principles offer a suitable framework, provided they are tailored to the domain of production technology, to enable economically successful circular value creation. The article presents an approach for this and illustrates it with various examples from the areas of 5G, sensor data management, automation and quality management.

Keywords: Data Management, Resilience, Sensing, Sustainability

1 Motivation

Das Versprechen zunehmenden Wohlstands und die Teilhabe Aller daran bei steigender Gesamtpopulation ist in Bezug auf Erhalt von Natur und Umwelt, sodass auch der Verantwortung für nachfolgende Generationen nachgekommen werden kann, eine der größten gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Dies spiegelt sich auch in den politischen Makrozielen zur Reduktion des Klimawandels wider – bspw. dem Erreichen von CO_2-Neutralität bis 2050 oder dem sogenannten 1,5 Grad Ziel. Die Naturkatastrophen der jüngeren Vergangenheit, die aktuelle Energiekrise sowie die steigende politische Präsenz rücken das Thema Nachhaltigkeit somit auch für produzierende Unternehmen in den operativen und strategischen Fokus.

Ein Megatrend, die Digitalisierung, gilt mit ihren Metaphern der Cyber-Physischen Systeme, abgebildet in Digitalen Zwillingen, als Enabler für die nachhaltige Gestaltung der Produktionstechnik. Dies wird sowohl in der produktionstechnischen Gemeinschaft [1], der Erforschung von neuen Technologien [2] als auch in der europapolitischen Ausrichtung konkretisiert [3]. Dennoch stand bei der Umsetzung von Industrie 4.0 bisher vor allem die Vernetzung der Ressourcen im Vordergrund [4]. Hiermit gehen zwei Herausforderungen einher: Um das Potential der Daten im Sinne der Nachhaltigkeit zu nutzen, muss der spezifische digitale Schatten nicht nur gespeichert, sondern auch zu Informationen, Wissen sowie konkreten Aktionen aggregiert und verarbeitet werden [2]. Zum anderen können Daten nicht über einen langen Zeitraum in praktisch unbegrenzter Menge gesammelt werden, ohne selbst zu einem erheblichen Treiber des CO_2-Fußabdrucks zu werden. Der Energieverbrauch der Datenspeicherung hängt im Einzelfall von vielen Faktoren ab, eine Überschlagsrechnung schätzt jedoch ein CO_2– Äquivalent von etwa einer Tonne für die Cloudspeicherung von 100 Gigabyte über 10 Jahre ab. Gleichzeitig wurde die Erwartung, dass die relevante Datenmenge bis 2025 auf ca. 80 Billionen Gigabyte zunimmt [1], bereits 2022 mit fast 100 Zettabyte, die erzeugt, gespeichert, verteilt und konsumiert wurden, übertroffen. Eine vollständige Speicherung der gesamten erzeugten jährlichen Brutto-Datenmenge über je 10 Jahre wäre in dieser Schätzung mit ca. 1.000 Milliarden Tonnen CO_2– Äquivalent verbunden – dies entspricht mehr als dem 20-fachen des weltweiten CO_2-Ausstoß 2021 [5]. Auch wenn viele Technologieunternehmen – darunter auch die Hyperscaler – selbst an der nachhaltigeren Gestaltung ihrer Dateninfrastruktur arbeiten [6], so wird deutlich, dass allein aus diesem Aspekt heraus ein konsequentes Datenmanagement sowie Strategien zur effizienten Aggregation der Daten und anschließenden Rohdatenreduktion notwendig sind.

Ein dritter aktueller Megatrend ist Resilienz als erstrebenswerte Eigenschaft für die Gesellschaft und damit auch für ihre produzierenden Unternehmen. In global vernetzten, komplexen Produktionssystemen haben unerwartete Störungen schnell weitreichende-Auswirkungen [7] – beispielsweise, wenn krisenhafte Situationen im Logistikbereich Containerpreise verachtfachen und die Rentabilität einer global verteilten Produktion in Frage stellen [8]. Betrachtet man nicht nur die Rentabilität, sondern geht von multidimensionalen Unternehmenszielen entlang der FESG-Kriterien aus [9], entsteht ein direkter Bezug zwischen Resilienz und Nachhaltigkeit.

Die drei Megatrends Nachhaltigkeit, Digitalisierung und Resilienz werden in der Perspektive der Life Cycle Sustainability fokussiert, da diese sowohl eine Konkretisierung der Makroziele als auch technologischer Strategien ermöglicht. Außerdem schafft diese einen Bezugsrahmen für die Implementierung des notwendigen Datenmanagements. Zentraler Aspekt dessen sind geeignete Datenstrukturen. Dieser Beitrag betrachtet die o.g.

Fokussierung der Megatrends in drei Hauptabschnitten: Zunächst wird das Konzept der Life Cycle Sustainability motiviert und die Rolle der Daten entlang der Wissenspyramide hervorgehoben (Abschnitt 2). Anschließend werden der Resilienzbegriff für die Life Cycle Sustainability interpretiert und die Implikationen für Datenstrukturen und Algorithmen abgeleitet (Abschnitt 3). Abschließend werden technologische Lösungsansätze als Bausteine zur Erreichung einer resilienten Life Cycle Sustainability vorgestellt (Abschnitt 4).

2 Daten als Enabler der Life Cycle Sustainability

2.1 Life Cycle Sustainability – Definition und Zielsetzung

Die Ursprünge der Life Cycle Sustainability liegen im Life Cycle Thinking [10]. Life Cycle Thinking fordert die Betrachtung des kumulierten Fußabdrucks eines Produktes über seinen gesamten Lebenszyklus, oft auch als *cradle to grave* bezeichnet. Life Cycle Thinking wurde bereits 2003 in die *Integrated Product Policy* der Europäischen Union mit Fokus auf ökologische Nachhaltigkeit aufgenommen [11]. Die Erweiterung hin zu Life Cycle Sustainability lässt sich in die Entwicklung des Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) einordnen [10], [12]. Der ursprüngliche Betrachtungshorizont umfasst die Kriterien der ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit [12]. Ohne Einschränkungen können hier jedoch weitere Kriterien und eine Gewichtung dieser mit einbezogen werden, sodass Life Cycle Sustainability insbesondere auch mit einer an den FESG-Kriterien ausgerichteten, grünen und wirtschaftlichen Produktion kompatibel ist.

Die Umsetzung der Life Cycle Sustainability setzt damit die Optimierung – d.h. Reduzierung – des Fußabdrucks eines Produkts im Rahmen definierter Nachhaltigkeitskriterien entsprechend des Life Cycle Thinking als Ziel voraus. Damit ist es aus einer Zielperspektive, insbesondere im ökologischen Bereich, kongruent zu Closed-Loop Ansätzen sowie der Idee einer Circular Economy. Aus der Herausforderung der Ressourcenknappheit bei steigendem globalem Wohlstand sind über die Zeit verschiedene Frameworks entstanden [13]. Hier seien exemplarisch *Cradle-to-Cradle,* das *Ricoh Comet System* sowie die *Performance Economy* genannt. Ihnen gemein ist die Darstellung der Zirkularität auf mehreren Ebenen vom Produkt bis zum Rohmaterial. Die nachhaltige Gestaltung der Produktion wird daher oftmals synonym mit der Umsetzung einer Circular Economy verstanden. Auch wenn dies aus akademischer Sicht nicht vollständig zutreffend ist, sind die entwickelten Strategien und Technologien auch für die Erreichung einer Life Cycle Sustainability zielführend. Kompakt können die übergeordneten Strategien als *9R - Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle, Recover -* zusammengefasst werden [14].

Als Konsequenz muss im Zuge der Life Cycle Sustainability der Betrachtungshorizont über den Fokus auf ein Produkt und einen Lebenszyklus, wie er zunächst im Life Cycle Thinking zu impliziert sein scheint, hinaus erweitert werden. Aus dieser Motivation heraus schlägt dieser Beitrag eine spezifischere Definition der Life Cycle Sustainability vor, welche die Erweiterung auf mehrere Lebenszyklen explizit vorsieht:

> *Life Cycle Sustainability ist die objektive Erfüllung definierter Nachhaltigkeitskriterien über den gesamtem Lebenszyklus eines Produktes inklusive der Betrachtung vorheriger und nachfolgender Lebenszyklen des Produktes selbst oder einzelner Bestandteile.*

Abbildung 1 stellt dieses Verständnis grafisch dar: Über mehrere Lebenszyklen und Nutzungsphasen hinweg können ein Produkt bzw. seine Bestandteile verschiedene Zustände aufweisen. Life Cycle Sustainability wird erreicht, wenn über diese Zustände hinweg definierte Nachhaltigkeitskriterien erfüllt werden.

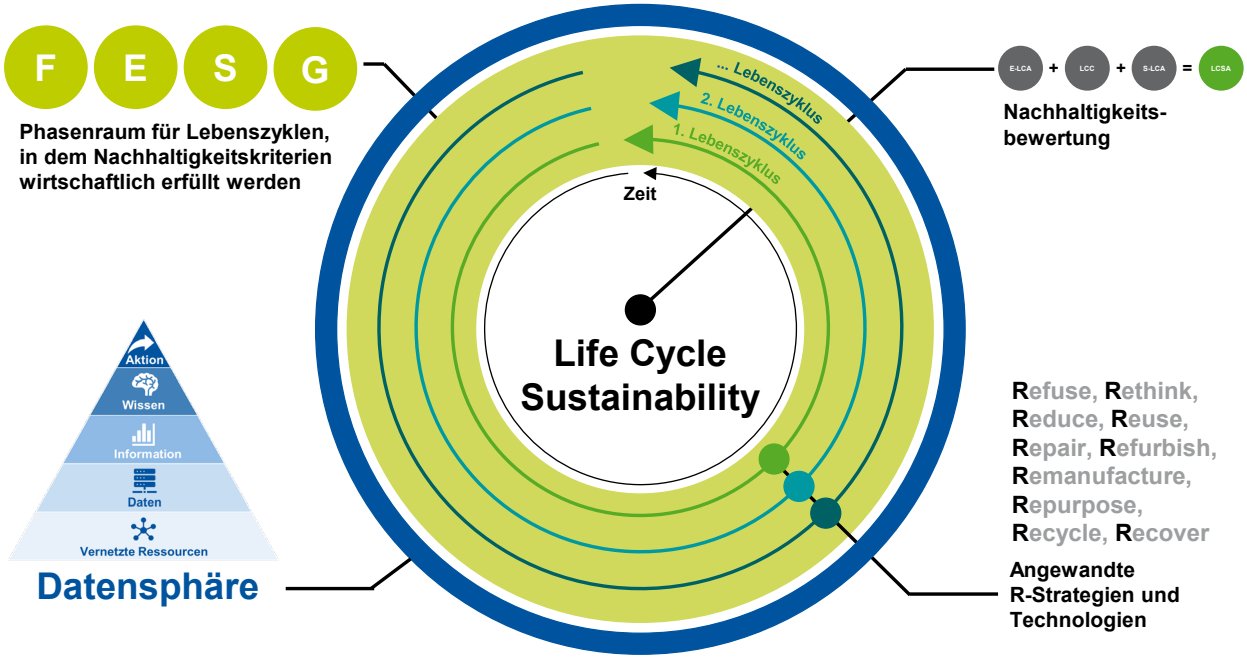


Abbildung 1: Erweitertes Verständnis von Life Cycle Sustainability in diesem Beitrag

Angewandte Nachhaltigkeitsstrategien und geeignete Technologien sind notwendig, um den Übergang zu neuen Zuständen, die das Einhalten der Kriterien mit einem längeren Zeithorizont erlauben, zu erreichen. Die physikalischen Lebenszyklen werden durch eine Datensphäre ergänzt, welche in zweierlei Hinsicht notwendig ist: Zum einen ermöglicht sie, eine objektive Nachhaltigkeitsbewertung mittels datenbasierter Kennzahlen abzubilden. Zum anderen sind die Daten die Grundlage für die notwendigen Informationen, die zielgerichtete Aktionen und die Anwendung von Nachhaltigkeitsstrategien ermöglichen.

2.2 Datengetriebene Nachhaltigkeitsstrategien und -bewertung

Zur Umsetzung der 9R Strategien und ähnlicher Ansätze sind Digitale Zwillinge entscheidend und stellen einen Enabler dar, ein erhebliches Nachhaltigkeitspotential zu heben. [1], [2], [13]. KRISTOFFERSEN et. al. konkretisieren diese Annahme in einem an der Wissenspyramide ausgerichteten Review bereits veröffentlichter Ansätze, welches im in Abbildung 2 gezeigten *Smart Circular Economy Framework* mündet [2].

Zentrales Element der Wissenspyramide als Ordnungsrahmen ist dabei der Datenfluss und die entsprechende Verarbeitung über die Ebenen hinweg:

- **Vernetzte Ressourcen** sind die Grundlage zur Erhebung relevanter Daten über den gesamtem Lebenszyklus hinweg.
- **Daten** sind die Rohform einer aufgenommenen Information sowie ihrer Darstellung als Zeichen, jedoch ohne Kontext und Interpretation.
- **Informationen** werden aus Daten gewonnen, bspw. durch Interpretation, Aggregation und Kontextualisierung. Sie ermöglichen deskriptive Analysen.

- **Wissen** stellt die Weiterentwicklung von Informationen zu Insights und Entscheidungsgrundlagen dar, und ermöglicht diagnostische bzw. explorative Maßnahmen.
- **Aktionen** sind die konkrete, ggf. autonome Umsetzung von Entscheidungen auf Basis des gewonnenen Wissens. Hierzu zählen insbesondere prädiktive und präskriptive Methoden.

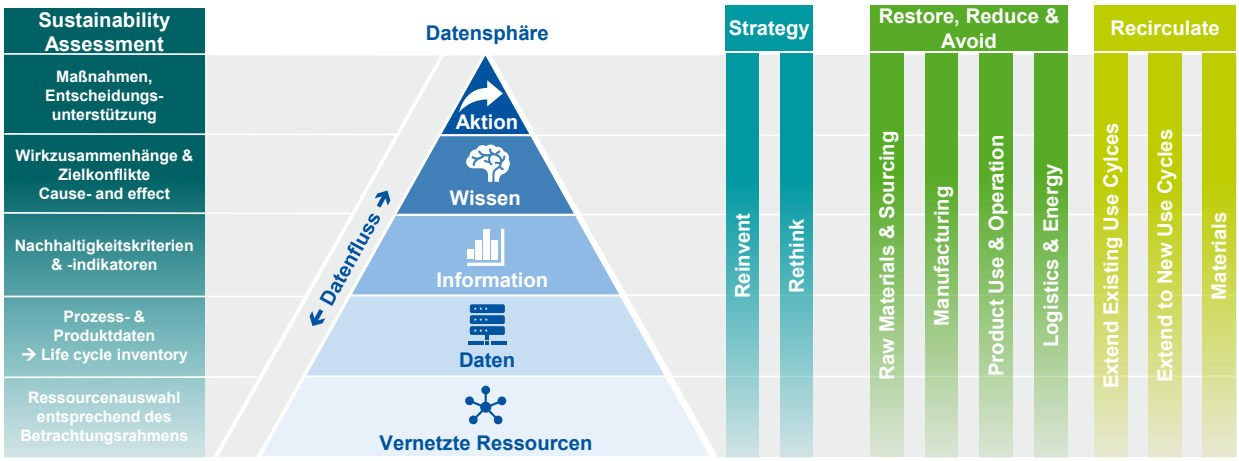


Abbildung 2: Smart Circular Economy Framework nach KRISTOFFERSEN et al [2] sowie Ebenen der Nachhaligkeitsbewertung

Die Wissenspyramide ist gleichzeitig ein Ordnungsrahmen für die objektive Nachhaltigkeitsbewertung, da an ihr die Aggregation verfügbarer Daten über Kennzahlen und Indikatoren hin zur Beurteilung der erwarteten Erfüllung von Nachhaltigkeitskriterien erfolgen kann. Die Wichtigkeit einer objektiven Bewertung kann an der Frage der Sekundäreffekte verdeutlicht werden: Ist es im Betrachtungshorizont des ersten Lebenszyklus beispielsweise möglich, das eingesetzte Material praktisch vollständig in einem neuen Produkt zu recyclen, erscheint dies zunächst ökologisch nachhaltig. Wird mit dem neuen Produkt jedoch ein Bedarf adressiert, der zugleich auch kreiert wird, ist der Fußabdruck nicht kleiner als zuvor. Ein ähnlicher Effekt tritt auf, wenn, bspw. durch Refurbishment, ein Second-Hand-Markt entsteht, der jedoch durch die geringeren Kosten eine vom Primärmarkt disjunkte Käuferschaft adressiert [13]. Daher ist es auch notwendig, den Bezugsrahmen von Nachhaltigkeitsindikatoren möglichst objektiv zu quantifizieren. Darüber hinaus ist transparente Nachhaltigkeitsbewertung ein wichtiger Baustein zur Integration von Kundschaft und Mitarbeitenden in die Nachhaltigkeitsstrategie. So legen GRANSKOG et al. dar, dass durch diese Integration und Kommunikation die Synergie von Nachhaltigkeit und Wertschöpfung besser gelingen kann [15].

Zur Operationalisierung, vor allem auf den unteren Ebenen der Wissenspyramide, ist die Dekomposition der definierten Kategorien- und Kriterien-spezifischen Nachhaltigkeitsindikatoren in konkrete quantifizierbare Größen, die Nachhaltigkeitskennzahlen, notwendig, damit Datenerhebung, -darstellung sowie -verarbeitung und damit auch die entsprechenden Datenstrukturen gestaltet werden können. Abbildung 3 zeigt die Kategorien eines von SOHNIUS et al. entwickelten Kennzahlenmodells, welches eine solche Dekomposition darstellt [16]. Spezifische Größen sind beispielsweise der absolute Materialverbrauch für Verpackung in Tonnen (Ökologie/Materialien) oder die Fluktuation der Mitarbeitenden (Soziales/Beschäftigungsverhältnis).

Insgesamt wird auf Seite der Nachhaltigkeitsstrategien deutlich, dass die verfügbaren Technologien und ihr Impact in den höheren Ebenen der Wissenspyramide zunehmen. Das gleiche gilt für die objektive Nachhaltigkeitsbewertung, die nur bei geeigneter Datenaggregation- und Verarbeitung gelingen kann. Im Ziel der Life Cycle Sustainability erstreckt sich diese Voraussetzung zudem über mehrere Lebenszyklen. Die umfassende Vernetzung von Ressourcen sowie langfristige und belastbare Verfügbarkeit nutzbarer Daten werden somit zur grundlegenden Voraussetzung zur Gestaltung einer Grünen Produktion.

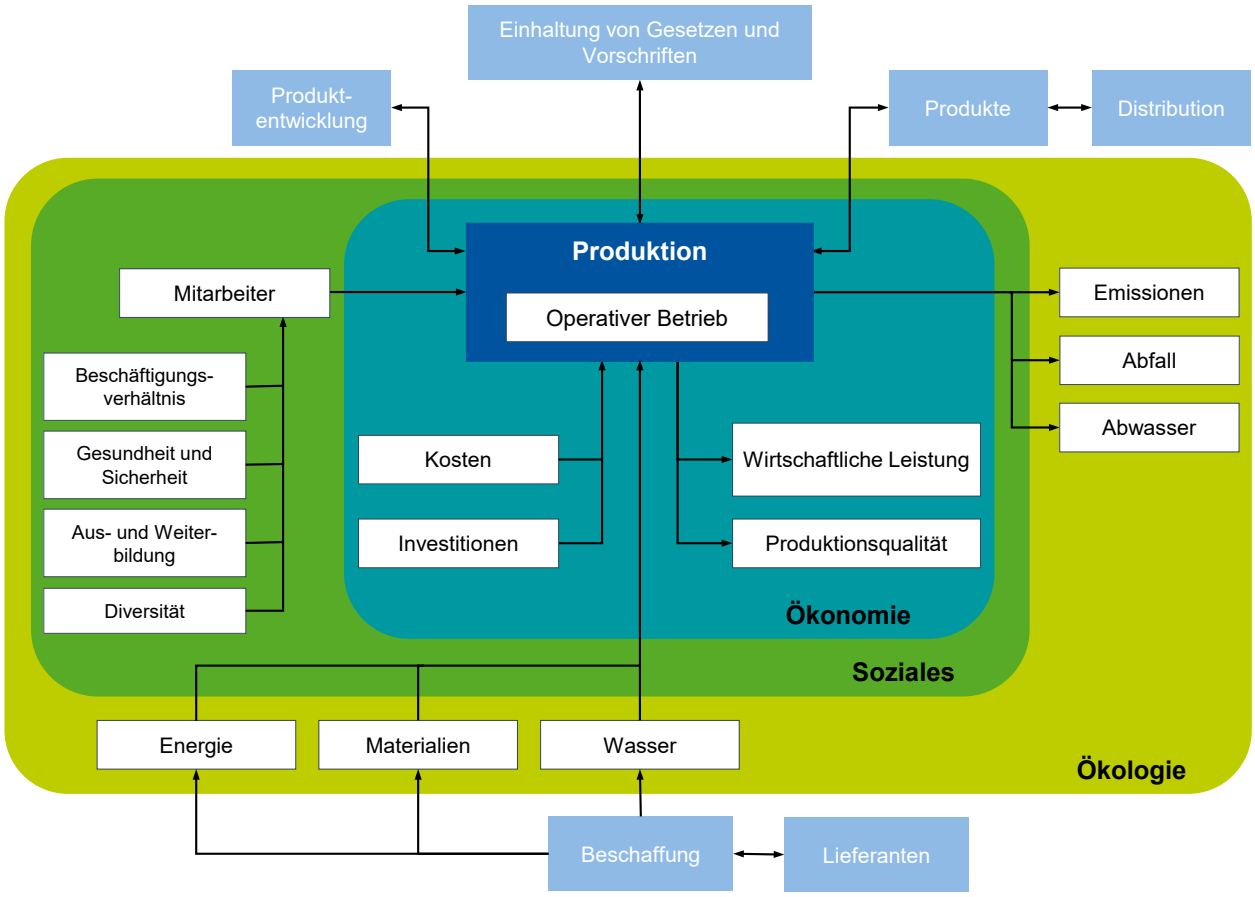


Abbildung 3: Kategorien messbarer Größen zur Beurteilung der Erreichung definierter Nachhaltigkeitskriterien nach SOHNIUS et al. [16]

3 Resilientes Produktionsdatenmanagement

3.1 Resilienz – Definition und Herausforderungen

Resilienz ist ein Begriff, der in mehreren Wissenschaftsdisziplinen definiert und dabei mit unterschiedichen Eigenschaften konnotiert ist. Im Bereich der Produktionstechnik versteht man hierunter im Allgemeinen die Fähigkeit eines Systems, in Anbetracht einer Störung oder eines anderen, unerwarteten Stimulus, innerhalb einer gewissen Erholungszeit, zu einem wertschöpfenden Zustand zurückzukehren [4]. Darüber hinaus wird die Resilienz häufig mit Charakteristika wie Robustheit, Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Agilität verbunden [17].

Für das Ziel einer resilienten Life Cycle Sustainability schlagen die Autoren vor, den Resilienzbegriff wie folgt zu definieren:

Resilienz in der Life Cycle Sustainability bezeichnet die Fähigkeit, in Anbetracht eines unerwarteten Ereignisses definierte Nachhalitkeitskriterien über den gesamten Lebenszyklus weiterhin, ggf. unter Aufnahme eines begrenzten zusätzlichen Fußabdrucks, aufrecht zu halten.

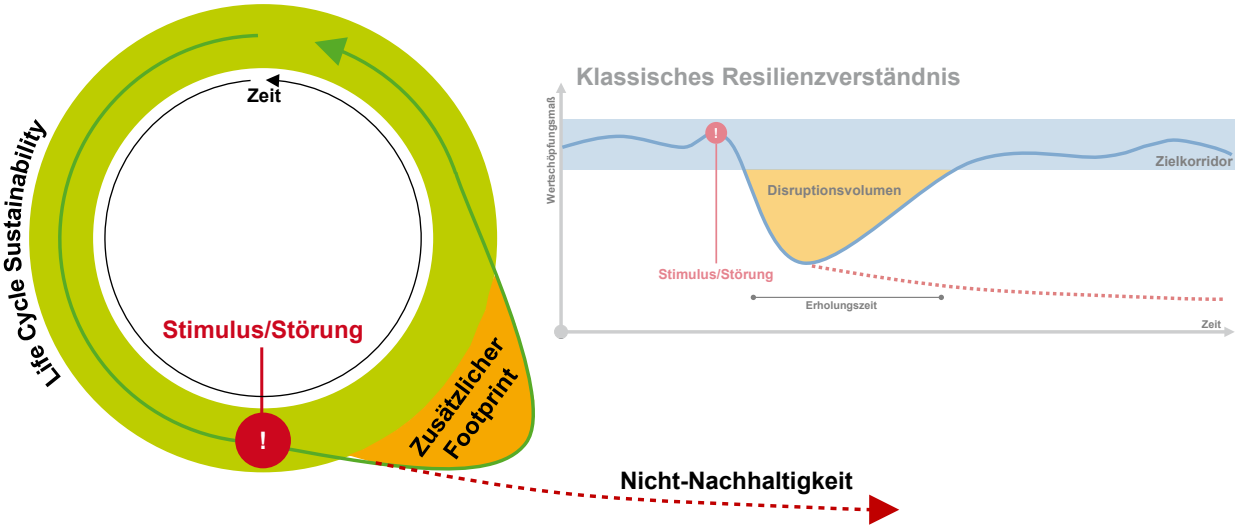


Abbildung 4: Reinterpretation des Resilienzbegriffes für Life Cycle Sustainability

Diese Re-Interpretation überführt den im Vergleich zum geläufigen Resilienz-Verständnis linearen in einen sich über ggf. mehrere Lebenszyklen erstreckenden zirkulären Zielkorridor (Abbildung 4).

Auf Grundlage dessen, dass wesentliche Technologien und Strategien zur Erreichung einer Life Cycle Sustainability datengetrieben sind (vgl. Abschnitt 2), ergeben sich bezogen auf die Resilienz unter anderem folgende konkrete Herausforderungen für das Datenmanagement:

1. Die Datenverfügbarkeit selbst muss resilient werden in dem Sinne, dass eine mangelnde Verfügbarkeit im Moment der Anwendung datengetriebener Technologien nicht selbst zu einer Störung werden darf.
2. Daten müssen in geeigneter Form vorgehalten werden, um bei einer Störung schnell und mit begrenztem Fußabdruck technologisch reagieren zu können. Dies betrifft nicht nur die Verfügbarkeit der Daten selbst, sondern auch deren Verarbeitung entlang der Wissenspyramide.
3. Es müssen Möglichkeiten zur Erhebung notwendiger, jedoch zuvor nichtexistierender Daten berücksichtigt werden, beispielsweise auf Basis der Messtechnik.
4. Zur Entscheidungsfindung müssen Daten zur Bewertung der Reaktion in Bezug auf den zusätzlichen Fußabdruck und die langfristige Erreichbarkeit der Nachhaltigkeitsziele geeignet vorliegen.
5. Das Datenmanagement muss über sehr langfristige Zeiträume sichergestellt werden.
6. Die Implementierung des Datenmanagements selbst, insbesondere das Vorhalten und Verarbeiten von Daten, bringt einen eigenen, zusätzlichen Beitrag zum Fußabdruck im Sinne des Life Cycle Thinkings ein.

Diese Herausforderungen münden zum einen in der Notwendigkeit der Etablierung des Produktionsdatenmanagements als eigenständige Aufgabe, zum anderen in der Anpassung oder Erweiterung bestehender Bereiche der Produktionstechnik, wie z.B. Qualitätsmanagement und Automatisierung.

3.2 FAIR Data und FACT Algorithms

Die Verarbeitung und Aggregation von Daten entlang der Wissenspyramide erfordert ihre zweifels- und fehlerfreie Interpretation. Nur so kann sichergestellt werden, dass Inkonsistenz verschiedener Daten erkannt und Fehlentscheidungen vermieden werden können [18], um die Resilienz der Life Cycle Sustainability zu stärken. Ein ausreichender Umfang an Dokumentation mittels Metadaten und Kontextinformationen zu erfassten und gespeicherten Daten ist daher Grundvoraussetzung dafür diese Daten zu finden, zu verstehen und (wieder-) zu verwenden, sowie aus dem daraus abgeleiteten Wissen Entscheidungen zu treffen. Diese Ausgangslage mündete 2016 in die von WILKINSON et al. vorgestellten „FAIR Guiding Principles“ für Daten [19]. „FAIR“ ist hierbei nicht im herkömmlichen Sinne zu verstehen, sondern als Akronym der englischen Begriffe für die vier Säulen nachhaltigen Datenmanagements: *Findability, Accessibility, Interoperability* und *Reusability*, vgl. Abbildung 5. Aufgeschlüsselt in mehrere Aspekte der vier Prinzipien, formulieren WILKINSON et al. folgende Anforderungen:

Findability - Um Daten überhaupt verwenden zu können, müssen Daten zunächst gefunden werden können. Dies erfordert zum einen eindeutige und persistente Identifikatoren für Daten, sowie die Beschreibung der Daten anhand ausführlicher Metadaten, welche sowohl Menschen als auch Algorithmen ermöglichen mittels entsprechender Suchanfragen diese Daten zu finden. Technisch bedeutet dies, dass sowohl Daten als auch Metadaten in einem durchsuchbaren Index verwaltet werden, also beispielsweise einer Datenbank.

Accessibility - Wenn Daten gefunden werden können, müssen Sie im zweiten Schritt auch erreichbar sein. Dies bedeutet nicht, dass Daten frei verfügbar sein müssen, sondern dass die Zugriffsregeln klar und transparent kommuniziert werden, d.h. nachvollziehbar ist, wer und unter welchen Bedingungen Zugriff auf die Daten erhalten kann. Auf technischer Ebene ist dazu die Verwendung standardisierter und öffentlicher Datenformate und Datenaustauschprotokolle erforderlich, sowie die technische Netzanbindung der Speicherressource.

Interoperabilitiy - Interoperabilität erfordert, dass Daten allgemein verständlich und interpretierbar sind. Kernaspekt dessen ist die Verwendung bekannter und definierter Terme und Sprachen für die Darstellung der Daten (bzw. der darin enthaltenen Informationen). Das Weiteren kann die Interoperabilität von Daten durch Referenzieren anderer Metadaten und Daten, also der Einordnung in einen größeren Kontext, erheblich gesteigert werden.

Reusability - Die Einhaltung der zuvor genannten drei Kriterien ist notwendig, um Daten zu einem späteren Zeitpunkt nutzen zu können, reicht aber allein nicht aus. Um entscheiden zu können, ob Daten für eine spezifische Anwendung (wieder)verwendet werden können, müssen Informationen zum Ursprung der Daten und allen relevanten Attributen verfügbar sein. Dabei ist die Einhaltung von domänen-spezifischen Anforderungen und die Angabe einer Nutzungslizenz elementar.

Werden Daten gemäß der FAIR Prinzipien erfasst, verwaltet und gespeichert, erfüllt auch das Datenmanagement selbst Nachhaltigkeitsaspekte. Daten, zu denen keinerlei oder

wenig Informationen über ihren Kontext gespeichert sind, können nicht eindeutig interpretiert und damit auch nicht (wieder-) verwendet werden. Solche Daten können daher als verloren betrachtet werden [20] und stellen, falls trotzdem langfristig gespeichert, einen zusätzlichen und vermeidbaren Fußabdruck dar.

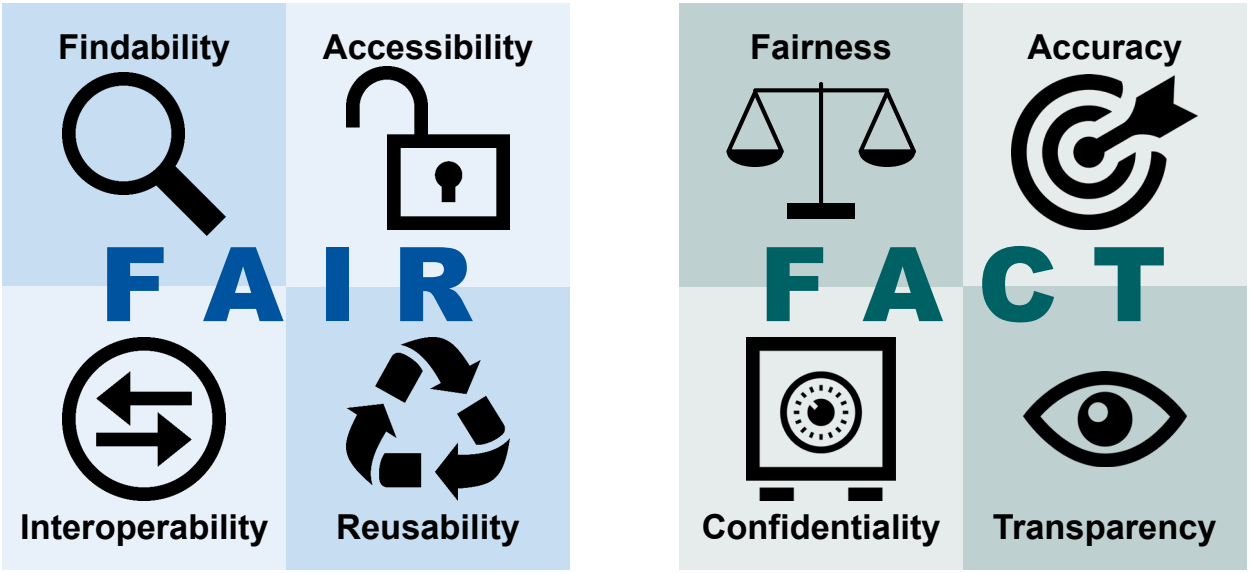


Abbildung 5: Links: die "FAIR Guiding Principles" für Daten [19], rechts: Herausforderungen der verantwortungsvollen Datenanalyse [21]

Die Aggregation und Verarbeitung von Daten entlang den einzelnen Ebenen der Wissenspyramide umfasst eine Vielzahl von Algorithmen und Softwarebausteinen, welche auch Verfahren des Maschinellen Lernens umfassen können. Um die Belastbarkeit der abgeleiteten Entscheidungen im Sinne einer resilienten Life Cycle Sustainability zu erreichen, müssen nicht nur die zugrunde liegenden Daten interpretierbar, genauer FAIR, sondern auch die maschinelle Datenverarbeitung bzw. die Algorithmen korrekt und nachvollziehbar sein [22]. Dies knüpft an die Kriterien für eine verantwortungsvolle Datenanalyse an, welche VAN DER AALST et al. [21] anhand von vier Bedingungen darstellen: Fairness, Genauigkeit, Vertraulichkeit und Transparenz, vgl. Abbildung 5.

Fairness - Fairness bezieht sich dabei nicht auf die zugrunde liegenden Daten und die FAIR Prinzipien, sondern auf eingesetzte Algorithmen und fordert die Unvoreingenommenheit dieser. Das heißt sowohl die für das Training verwendete Datengrundlage als auch die Implementierung des Algorithmus müssen sicherstellen, dass die Datenauswertung nicht verzerrt wird.

Accuracy - Aufgrund der hochdimensionalen Datenräume und heterogenen Eingangsdaten komplexer Algorithmen und Softwarelösungen ist die Präzision eines Ergebnisses, sowohl im Sinne der Genauigkeit einer Berechnung als auch ihrer Wiederholbarkeit, oft nicht nachvollziehbar. Daher ist es wichtig, nicht nur ein Ergebnis, sondern auch eine Angabe über dessen Genauigkeit, ggf. der Sensitivität gegenüber veränderten Eingangsgrößen, zu ermitteln und zurückzugeben. Eingeschlossen wird in dieser Definition häufig auch der Begriff der Korrektheit, also die Eigenschaft, wie genau ein spezifischer Sachverhalt algorithmisch abgebildet wird. Zu unterscheiden ist also zwischen im engeren Sinne „accuracy“ and „correctness“.

Confidentiality - Verarbeitete Daten enthalten unter Umständen sensible Informationen. Um die Datensouveränität sicherzustellen, dürfen von Algorithmen berechnete Ergebnisse daher keine Rückschlüsse auf diese sensiblen Eingangsdaten zulassen. Ebenso

darf ein Ergebnis auch keinen Rückschluss auf die implementierungs-technischen Details eines Algorithmus ermögliche, weil der Algorithmus selbst geistiges Eigentum ist. Daher ist die Sicherstellung der Vertraulichkeit sowohl der Daten als auch der Algorithmen ein integraler Bestandteil verantwortungsvoller Datenanalyse.

Transparency - Zuletzt müssen eingesetzte Verfahren transparent sein, damit die berechneten Ergebnisse nachvollziehbar sind. Algorithmen dürfen nicht als Black-Box betrachtet und eingesetzt werden, da die Ergebnisse sonst nicht von Menschen verstanden werden können. Transparency stellt dabei keinen Widerspruch zu Confidentiality dar, dennoch ist die parallele Realisierung beider Anforderungen eine große Herausforderung.

3.3 Von FAIR und FACT zu Produktionsdatenmanagement

Die Etablierung eines Produktionsdatenmanagements auf Basis von FAIR und FACT birgt großes Potential für die Erreichung der Resilienz der Life Cycle Sustainability, ist jedoch aufgrund der technischen und organisatorischen Randbedingungen in der Produktion eine große Herausforderung. Betrachtet man den Datenlebenszyklus in der Produktion (Abbildung 6) wird deutlich, dass FAIR und FACT umfassende Bedeutung haben und in nahezu allen Abschnitten des Datenlebenszyklus berücksichtigt werden müssen.

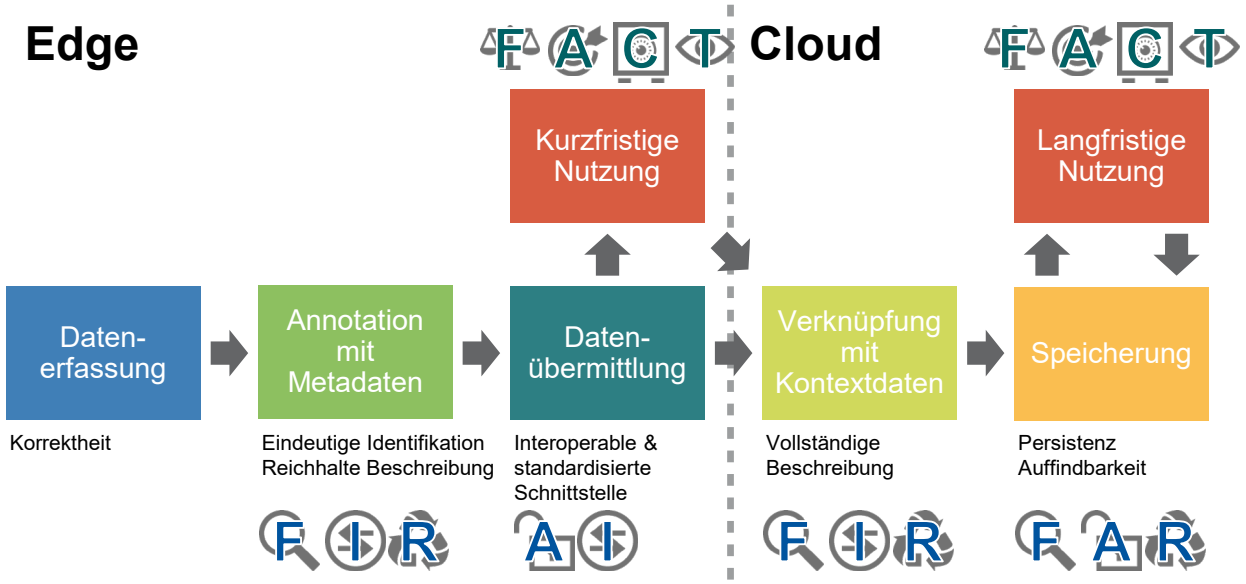


Abbildung 6: Der FAIRe Datenlebenszyklus nach BODENBENNER et al. [23]

Eines der Kernprobleme bei der Umsetzung der FAIR Prinzipien ist die Heterogenität. So existiert nicht nur eine sehr große Menge sehr verschiedener (Mess-)Systeme zur Erfassung von Daten und dementsprechend unterschiedliche Modelle und Formate zur Repräsentation, sondern eine ebenso heterogene Gruppe an Stakeholdern sowie möglicher daten-getriebene Anwendungen, die jeweils andersartige Anforderungen an die Daten haben [24]. Die Herausforderung ist daher nicht nur die technische Vereinheitlichung verwendeter Modelle, Formate und Protokolle zur Speicherung und Übermittlung der Daten (Accessibility & Interoperability), für die bereits viele Ansätze, wie die Verwendung offener Standardprotokolle und Formate existieren, so zum Beispiel OPC UA, MQTT oder JSON und XML. Kritisch für die langfristige Nutzung der Daten ist vor allem deren Kontextualisierung [25]. Dazu ist die Annotation durch aussagekräftige Metadaten und die Verknüpfung mit anderen Daten notwendig, damit Daten gefunden und auf ihre Verwendbarkeit

hin bewertet werden können (Findability & Reusability). Daten dementsprechend zu verwalten und die Auffindbarkeit für beliebige, teils noch unbekannte, Anwendungen und Szenarien zu ermöglichen stellt die zentrale Herausforderung dar. Einfach alle erfassten Daten zu speichern, da sie eventuell eines Tages relevant sein könnten, stellt keine ausreichende Lösung dar. Zum einen müssen auch diese Daten kontextualisiert sein, da sie sonst nicht in Informationen oder Wissen transformiert werden können, zum anderen verbraucht die Speicherung der Daten in zentralen Datenspeichern, wie Cloud-Systemen, eine große Menge Energie. Datenspeicherung hat also selbst einen signifikanten Fußabdruck, der zur Einhaltung der Zielwerte der Nachhaltigkeitskriterien und somit das Erreichen der Life Cycle Sustainability auf ein notwendiges Minimum reduziert werden sollte. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass zum Zeitpunkt der Datenerhebung die konkrete Nutzung in der Langzeitperspektive noch nicht bekannt ist und aus der Retrospektive geeignete Datensätze identifiziert werden müssen. Schlüssel dazu ist die Speicherung der Kontextdaten, auch über den Zeitraum der Speicherung der eigentlichen (Mess-)Daten hinaus. Für die Bewertung der Verwendbarkeit eines Datensatzes sind in erster Linie nur die Kontextinformationen notwendig, nicht die Daten selbst [19]. Da Kontextinformationen in der Regel eine deutlich geringere Änderungsrate haben als die Daten selbst, kann so zunächst der DatenFußabdruck reduziert werden. Insbesondere können die Daten selbst bei Bedarf und ausführlicher Dokumentation mittels Kontextinformationen reproduziert oder nicht (mehr) vorliegende Daten erhoben werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Synthetisierung geeigneter Daten.

Der datengetriebene Erkenntnisgewinn in der Produktion beruht verstärkt auf nicht monolithischen, sondern service-orientierten Anwendungen. Bestandteil dieser Anwendungen sind in der Regel zusammengesetzte IT-Systeme, die auch Plattformen externer Unternehmen, wie Cloud-Systeme, und mehrschichtige Architekturen einschließen [26]. Insbesondere nimmt die Rolle von Dienstleistenden, welche die Verarbeitung der Daten sowie die Bereitstellung von Analysen und Handlungsempfehlungen anbieten, stetig zu [27], [28]. Diese Ausgangssituation führt zu einer mehrschichtigen Vertrauensproblematik: Aus Sicht des produzierenden Unternehmens sind die verwendeten Daten hoch sensibel, da sie Rückschlüsse auf Betriebsgeheimnisse zulassen können oder diese sogar selbst darstellen [29]. Für Software-Dienstleistungsunternehmen ist die Kontrolle über die Nutzung und Geheimhaltung der Implementierungsdetails der verwendeten Algorithmen essenziell zur Sicherung der Geschäftsgrundlage [30]. *Confidentiality* ist somit eine substanzielle Voraussetzung für Datensouveränität.

Dem gegenüber steht jedoch die Anforderung an *Transparency*. Die Datenverarbeitung muss transparent und nachvollziehbar sein, um hieraus abgeleitete Entscheidungen absichern und verantwortungsvoll gestalten zu können. Außerdem kann nur so eine objektive Bewertung von Maßnahmen gegenüber gewählten Nachhaltigkeitszielen sichergestellt werden [31]. Zusätzlich muss auch die Unsicherheit der gewonnen Information berücksichtigt werden, um ihre Belastbarkeit sicherzustellen und das Risiko damit verbundener Entscheidungen zu bewerten.

In der Messtechnik ist beispielsweise die mit dem Messwert assoziierte Messunsicherheit das wichtigste Gütekriterium für die Qualität der Messung [32]. Bei der Verarbeitung von Messdaten durch Algorithmen gehen diese Informationen häufig verloren, da der Beitrag eines beliebigen Algorithmus zur Unsicherheit des Ergebnisses nur schwer oder unter Umständen gar nicht bestimmt werden kann. Das Kriterium der Transparency muss daher im Kontext der des Produktionsdatenmanagements auch die Sicherstellung von Korrektheit und Genauigkeit von Algorithmen umfassen.

Die FAIR- und FACT-Prinzipien legen wichtige Gestaltungsrichtlinien dar, an denen sich auch das Produktionsdatenmanagement orientieren sollte. Dies gilt sowohl im Allgemeinen als auch in der Perspektive einer resilienten Life Cycle Sustainability, welche die Langzeitanforderungen und Vertrauenswürdigkeit fokussiert. Da FAIR und FACT dem Forschungsdatenmanagement entstammen, können diese jedoch nicht einfach übernommen, sondern müssen auf die domänenspezifischen Eigenschaften der Produktionstechnik adaptiert werden. Dies gilt insbesondere in komplexen Wertschöpfungsnetzwerken, in denen Kunden-, Lieferanten- und Wettbewerbsbeziehungen vorliegen und Datensouveränität wirtschaftlich entscheidend ist.

4 Datenstrukturen und technologische Lösungsbausteine

Die Etablierung von Produktionsdatenmanagement als Voraussetzung für Life Cycle Sustainability ist weder ein singuläres Handlungsfeld, noch kann eine einzige, allgemeingültige Umsetzung erwartet werden. Vielmehr ist es die Integration interdisziplinärer, datengetriebener Technologien und Methoden in den Dimensionen Mensch, Organisation und Technik in mehreren Handlungsfeldern. Nachfolgend seien hiervon einige mit Bezug auf die in Abschnitt 3 genannten Herausforderungen exemplarisch aufgeworfen:

- Das **Qualitätsmanagement** muss um die Betrachtung bereits a priori bekannter Nachhaltigkeitsstrategien (bspw. Reparatur oder Remanufacturing durch den Originalhersteller) erweitert werden. Dies betrifft insbesondere auch das Management der Daten, deren Notwendigkeit zur Technologischen Umsetzung oder Nachhaltigkeitsbewertung bekannt ist (vgl. Herausforderungen 4, 6).
- Techniken des Datenmanagement sowie der Datenverarbeitung, zusammengefasst als **Informationsmanagement** müssen spezifisch für die Produktion weiter adaptiert bzw. entwickelt werden. Dies ist insbesondere relevant, um den Datenfluss im Sinne der Wissenspyramide sicherzustellen, auch wenn die technologische Ausgestaltung von Nachhaltigkeitsstrategien und damit der:die Datenkonsument:in a priori nicht bekannt ist. Zudem bringen die Menge der Daten, die Langfristigkeit der Life Cycle Sustainability sowie der eigene Fußabdruck des Datenmanagements zusätzliche Anforderungen ein (vgl. Herausforderungen 2, 5, 6).
- Unter **Sensing** kann die Erfassung von notwendigen Informationen verstanden werden, zu welchen die notwendigen Daten jedoch nicht oder nicht mehr vorliegen. Dies umfasst zum einen die Betrachtung der Messtechnik als Enabler zur gezielten, situativen Erfassung von Daten (bspw. der Zustandsbewertung), aber auch eine weitere Interpretation des Begriffes hin zur Erfassung von Kund:innenfeedback oder Felddaten. Zusätzlich bringt die Metrologie als Disziplin wesentliche Aspekte der langfristigen, physikalischen Vertrauenswürdigkeit erhobener Daten ein (vgl. Herausforderungen 3, 5)
- Eine geeignete **Dateninfrastruktur** wird als Backbone datengetriebener Technologien zur unvermeidbaren Voraussetzung. Neben Fragen der Kompatibilität, Skalierbarkeit und Wirtschaftlichkeit steht jedoch auch die Resilienz und Nachhaltigkeit der Infrastruktur selbst im Fokus (vgl. Herausforderung 1).
- Die **Automatisierung** erhält im Zielbild einer resilienten Life Cycle Sustainability eine erweiterte Bedeutung. Durch sie können die Reaktionsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit sowie soziale Kompatibilität von technologischen Lösungen gesteigert werden, bspw. im Rahmen einer automatisierten Demontage. Dies setzt jedoch auch eine inhärent datengetriebene Automatisierung voraus. (vgl. Herausforderung 2)

- Die **Qualifikation von Mitarbeiter:innen** und Etablierung soziotechnischer Ökosysteme ist notwendig, da die entstehenden Produktionssysteme von erheblicher Komplexität sein werden. Die partizipierenden Akteur:innen müssen in die Lage versetzt werden, Entscheidungen im Sinne der Life Cycle Sustainability datenbasiert und objektiviert zu treffen (vgl. Herausforderungen 2, 4, 6)

In den genannten Handlungsfeldern sind geeignete Modelle und entsprechende Datenstrukturen dabei charakteristische, wiederkehrende Elemente. Nachfolgend werden diese anhand von technologischen Lösungsbausteinen als Beispiele konkretisiert. Diese erstrecken sich über alle Ebenen der Wissenspyramide.

4.1 5G als Infrastruktur (Vernetzte Ressourcen)

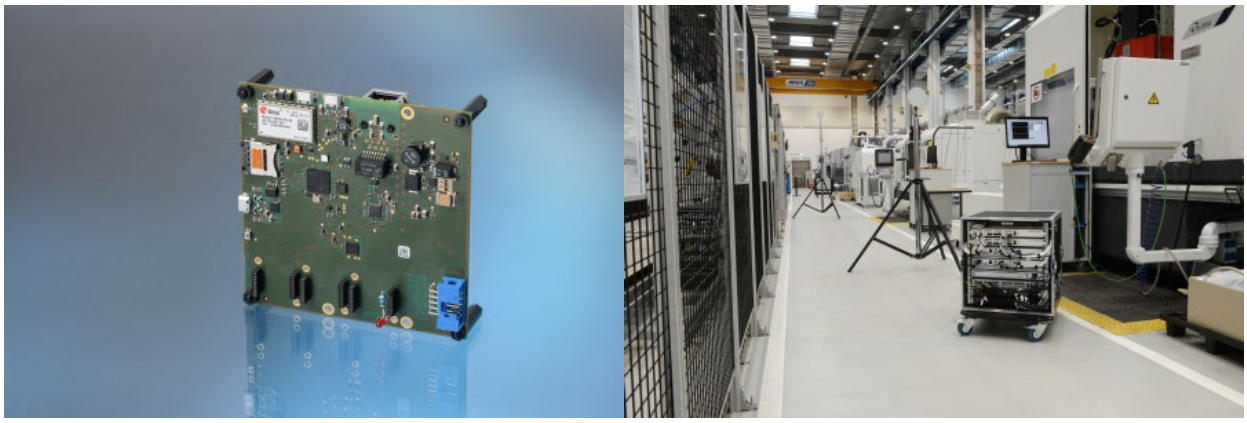


Abbildung 7: Links: Elektronikboard zur 5G-basierten Vernetzung von Sensoren. Rechts: Lokaler Testaufbau zur Evaluation von 5G Use-Cases in der Produktion. Bildquelle: Fraunhofer IPT

Die industrielle Kommunikation ist, insbesondere in der Automatisierung, schon immer mit hohen Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Echtzeitfähigkeit verbunden. Die Etablierung datengetriebener Technologien in der Produktionstechnik, aber insbesondere auch die Aspekte der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von automatisierten Systemen, überführen diese Anforderungen zusätzlich auf die drahtlose Kommunikation. Hinzu kommen die Anforderungen an die Resilienz cyber-physischer Produktionssysteme, welche, von SCHMITT et al. wie folgt zusammengefasst werden: Dezentrale IT-Strukturen, Datensicherheit, Modularität technischer Systeme, Konvergenz von Shopfloor und Office IT sowie Integration des Menschen in Soziotechnische Systeme [33]. Auf Netzwerkebene liegen zudem technische Anforderungen für die resiliente Gestaltung der Kommunikationsnetze selbst vor, wie sie bspw. der VDE in einem Positionspapier zusammenfasst [34].

5G ist hier eine Schlüsseltechnologie, welche die o.g. Anforderungen adressieren und als Backbone einer geeigneten Infrastruktur für vernetzte Ressourcen dienen kann. Es ist zudem durch das konvergente Design anschlussfähig an andere Netzwerktechnologien. Die verschiedenen Profile sind geeignet, die Vernetzung der Ressourcen für mehrere Aspekte der datengetriebenen Nachhaltigkeit abzubilden:

- Durch die Natur als Mobilfunkstandard wird die ortsunabhängige Vernetzung und damit die Erhebung von Daten im Feld ermöglicht, bspw. in der Nutzungsphase eines Lebenszyklus beim Kunden.

- Die Anwendungsprofile eMMB (enhanced mobile Broadband) und mMTC (massive Machine Type Communication) eignen sich zur Kommunikation großer Mengen von Sensordaten mit hoher Bandbreite oder eine hohe Anzahl von Sensoren. MOHANRAM et al. validieren die industrielle Anwendbarkeit beispielhaft anhand einer Multisensorplattform auf Basis eines STM32 [35]. Diese enthält für Monitoringzwecke Interfaces zu Dehnungsmesstreifen, Beschleunigungs- und Temperatursensoren und ist in Abbildung 7 dargestellt.
- Die Kombination von 5G und Time-Sensitive Networking ermöglicht die Realisierung drahtloser Automatisierungsnetze. KEHL et al. evaluieren diesen Ansatz für die Anwendung in der mobilen Robotik und zeigen, dass das Jitter (99.9% Intervall) auf unter 1µs reduziert und damit Echtzeitfähigkeit erreicht werden kann [36].

Die Entscheidung, ob sich eine Vernetzung von Ressourcen über 5G im Vergleich zu anderen Technologien lohnt, muss in Abhängigkeit der erwarteten Vorteile getroffen werden. KIESEL et al. stellen ein Modell zur techno-ökonomischen Bewertung latenzkritischer Anwendungen hinsichtlich der Zielkriterien Flexibilität, Mobilität, Produktivität, Qualität, Sicherheit, Nachhaltigkeit und Nutzungsgrad vor [37]. Dieser Ansatz kann auf die technologische Umsetzung datengetriebener Nachhaltigkeitsstrategien im Sinne von Abschnitt 2 und die Ziele der Life Cycle Sustainability übertragen werden.

4.2 Domänenadaptierte Datenstrukturen (Daten)

Damit Daten bei einer Störung der Life Cycle Sustainability schnell gefunden und abgerufen werden können, müssen Daten in einer indizierbaren und leicht durchsuchbaren Struktur gespeichert werden. Grundvoraussetzung dafür ist der Transfer der FAIR Prinzipien in die Produktionstechnik anhand spezifischer Anforderungen und der technischen Abbildung dieser. Neben der Verwendung einer einheitlichen Beschreibungssprache (vgl. Abschnitt 4.3) ist es erforderlich standardisierte Datenmodelle, -formate und Datenaustausch- bzw. Kommunikationsprotokolle zu verwenden [38] (vgl. Abschnitt 3.3). Dazu können aus der Informatik bekannte und standardisierte Lösungen für den Einsatz in der Produktionstechnik adaptiert werden. Die Bandbreite verfügbarer Lösungen reicht von Einzellösungen für einen der drei Aspekte bis hin zu „All-in-One“-Lösungen, wie beispielsweise OPC UA. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht verschiedener Modelle, Formate und Protokolle. Zum einen bedienen die Datenmodelle jedoch teils unterschiedliche Anwendungsfälle, sodass in der Regel mehr als nur ein Datenmodell umgesetzt werden muss, um Daten in erforderlichen Modellen bereitzuhalten, wodurch der Umsetzungsaufwand erheblich steigt. Zum anderen sind die meisten Modelle komplex und erfordern daher fortgeschrittene Datenmodellierungskenntnisse. Außerdem bleiben die FAIR Prinzipien in diesen Modellen mehrheitlich unberücksichtigt.

Tabelle 1: Beispiele für standardisierte Datenformate, Datenmodelle und Kommunikationsprotokolle für den Einsatz in der Produktionstechnik

Modell	Format	Protokoll
Asset Administration Shell	JSON	HTTP
Digital Calibration Certificate	XML	MQTT
OPC UA (via XML und TCP/IP)		
MTConnect		

Eine Infrastruktur und Datenstruktur, welche die Definition von Messsystem-Schnittstellen mit geringem Aufwand ermöglicht, wurde von MONTAVON et al. [39], [40] vorgestellt und von BODENBENNER et al. [41] zu einer Modellbeschreibungssprache weiterentwickelt. Alle Eigenschaften und Daten eines Messsystems können dadurch mittels vier verschiedener Elemente abgebildet werden: Variablen für die Darstellung von Messwerten, Parameter für einstellbare Eigenschaftswerte, Funktionen zur Ausführung komplexer Prozeduren und Objekten zur Strukturierung aller Eigenschaften. Jedes Element erfordert die Definition spezifischer vorgeschriebener Attribute, anhand der eine technische Interoperabilität mit anderem System sichergestellt werden kann. Diese Attribute umfassen bei Messwerten und Parametern unter anderem den zulässigen Wertebereich, die mathematische Dimension und auch die physikalische Einheit. Da alle diese Eigenschaften über die Schnittstelle stets zusammen mit dem eigentlichen Messwert bereitgestellt werden, können diese Werte ohne Vorwissen verarbeitet werden. So können zum Beispiel passende Speicher- oder Tabellenstrukturen von Datenbanken automatisiert und effizient aufgebaut und verwaltet werden. Abbildung 8 zeigt ein solches Datenpaket. Darüber hinaus kann das Datenmodell auch in komplexere Strukturen, wie z.B. OPC UA oder Asset Administration Shell übersetzt werden.


```
{
   “covariance”: [
         [1.3276206530821578e-10, 1.0791437929694123e-11, 7.9915972948561065e-11],
         [1.079143792969412e-11, 5.5091565613752213e-11, 1.0896977314156854e-11],
         [7.9915972948561065e-11, 1.0896977314156854e-11, 5.9079887330941402e-11]
      ],
   “datatype”: “double”,
   “description”: “Position in Cartesian Coordinates in meter.”,
   “dimension”: [3],
   “hash”: “3a785573eecfc75434572906c31bae675f1c173612bc25579c996bddf4e51a85”,
   “label”: “Calibration of machine tool.”,
   “name”: “Position [m]”,
   “range”: [-40, 40],
   “timestamp”: “2022-06-13T11:27:15.046550Z”,
   “unit”: “MTR”,
   “uuid”: “MEA-Position”,
   “value”: [2.4184784967537318, 0.32977268925781256, -3.8299400458421968]
}
```


Abbildung 8: Strukturiertes Datenpaket zum interoperablen Austausch von Messdaten gemäß [23], [40], Abbildung aus [38]

Interoperable Schnittstellen und Systeme tragen wesentlich zur Resilienz der Dateninfrastruktur von Produktionssystemen bei, da (Teil-)Ausfälle von Geräten oder Subsystemen mit geringem Aufwand durch andere, aber nicht notwendigerweise identische, Geräte oder Subsysteme ersetzt werden können. Außerdem senken sie die technische Hürde, ein möglichst automatisiertes, datengetriebenes und zeitnahes Life Cycle Sustainability Assessment zu implementieren.

4.3 Von Daten- zu Informationsmanagement mittels Kontextualisierung (Informationen)

Daten können im Wesentlichen auf zwei verschiedenen Wegen zu Informationen aggregiert werden:

Kontextualisierung – Durch die Beschreibung von Daten mittels Metadaten bzw. Metainformationen können Daten interpretiert und in einen größeren Zusammenhang eingeordnet werden. Einfaches Beispiel dafür ist die physikalische Einheit, ohne die Messwerte in verschiedenen Ländern unterschiedlich interpretiert werden könnten.

Datenauswertung – Mittels der Verarbeitung einer Datenmenge durch Algorithmen können Zusammenhänge von Daten aufgedeckt werden und lassen dadurch die Interpretation von Menschen zu. So können beispielsweise die einzelnen Positionsdaten einer mobilen Einheit zu einem Pfad zusammengefasst werden und durch den Abgleich mit den Solldaten die Abweichung der Bewegung ermittelt werden. Diese Information kann dann entsprechend weiterverarbeitet werden.

Bei der Auswertung von Daten durch Algorithmen wird zunehmend auf Machine Learning Verfahren gesetzt. Diese entsprechend der FACT Prinzipien und mit einem angemessenen Fußabdruck zu gestalten ist jedoch eine große Herausforderung [42]. Außerdem wird durch Machine Learning allein noch kein Informationsmanagement in der Langzeitperspektive erreicht.

Die Kontextualisierung stellt hier zunächst den leichtgewichtigeren Ansatz dar und kann auch als Vorstufe zur Datenauswertung deren Effizienz erhöhen. Zudem kann in der Kontextualisierung auch der Fußabdruck des Datenmanagements selbst nochmals reduziert werden: Insbesondere bei hochfrequenten Daten, deren Speicherung einen großen Fußabdruck bedeutet, kann die Speicherung von Kontextinformationen, die die Reproduktion der Daten möglich macht, den Fußabdruck erheblich senken. Voraussetzung dafür ist, dass die Daten in kurzer Zeit mit geringem Fußabdruck erzeugt werden können. Durch die Definition von FAIRen Datenmodellen kann Informationsmanagement synergetisch mit Datenmanagement betrieben werden, da die Beschreibung der Daten mit Kontextinformationen ein Grundprinzip von FAIR ist. FAIRe Daten können langfristig und zuverlässig zu Informationen kontextualisiert werden.

Da die Erfassung, Verarbeitung und Speicherung im Zuge steigenden Vernetzungsgrades verstärkt in massiv verteilten Systemen erfolgt, wird die nachträgliche Kontextualisierung von Daten erschwert. Entscheidend ist daher Daten so früh wie möglich, bestenfalls auf Geräte- oder Edge-Level, mit Metadaten und verfügbaren Kontextinformationen zu annotieren.

Dieser Ansatz wurde unter anderem von BODENBENNER et al. vorgestellt und baut direkt auf einer einheitlichen Datenstruktur auf, wie in Abschnitt 4.2 vorgestellt. Die Autoren stellen eine mehrschichtige Softwarearchitektur für *FAIR Sensor Services* vor, die sowohl die technische Interoperabilität der Daten als auch semantische Interoperabilität der Informationen zu Messdaten sicherstellt. Dazu wird wie die Software des Cyber-physikalischen Messsystems wie in Abbildung 9 gezeigt in drei Schichten unterteilt. Die unterste Schicht (**L1**) deckt dabei die geräte-spezifische und nicht verallgemeinerbare Implementierung des internen System-Logik ab. Die mittlere Schicht (**L2**), das sogenannte „FAIRification-Layer“, reichert die Daten basierend auf dem SOIL-Modell mit Metainformationen an, wie beispielweise der physikalischen Einheit. Die oberste Schicht (**L3**) implementiert die Kommunikationsschnittstelle und stellt alle Daten und Metadaten in einem standardisierten Datenformat über ebenfalls standardisierte Protokolle zur Verfügung. **L2** und **L3** können auf Basis des SOIL-Metamodells unabhängig vom spezifischen Gerät implementiert werden. Möglich wird dies durch die Adaption modell-basierter Softwareentwicklung, bei der mittels der „SensOr Interfacing Language (SOIL)“ [41], ein einfaches Modell für die Schnittstelle eines Messsystems definiert werden kann. Dieses Modell kann dann zur

automatisierten Generierung des FAIRification Layers, sowie der passenden Schnittstelle und des gewünschten Datenformates genutzt werden [23].

Dadurch liegen Messwerte schon unmittelbar nach der Messung nicht nur in Form eines Datums, sondern bereits als Information vor. Dies erhöht die Verfügbarkeit der Messwerte im Falle einer Störung der Life Cycle Sustainability. Außerdem kann so verhindert werden, dass die Speicherung undokumentierter und daher kaum verwendbarer Daten erfolgt.

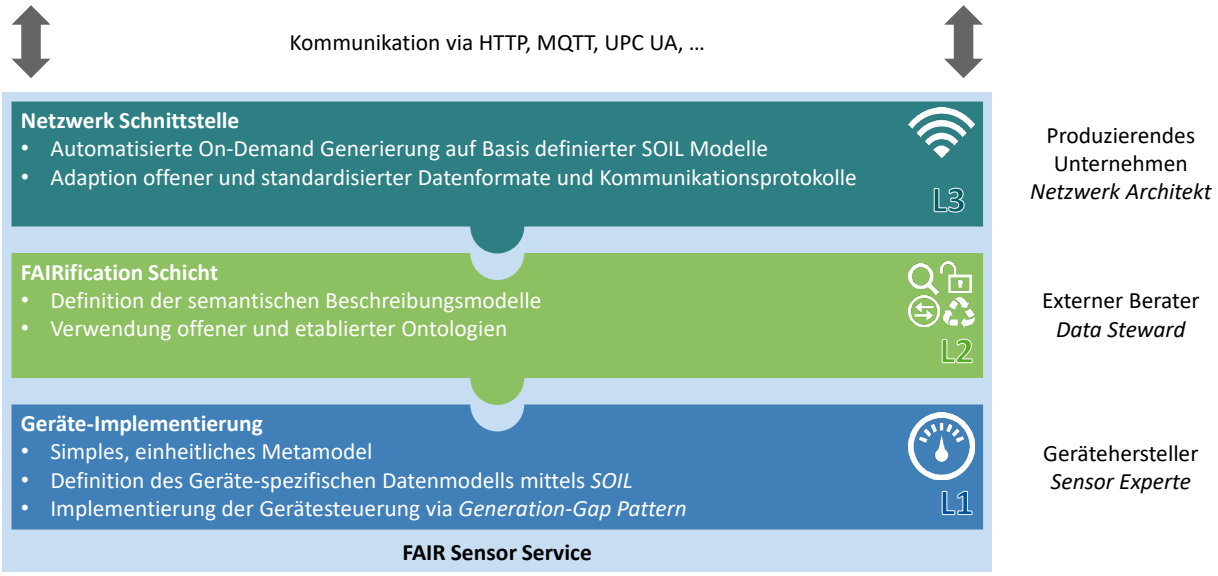


Abbildung 9: Softwarearchitektur eines "FAIR Sensor Services"

4.4 Der Digitale Zwilling als Automatisierungsvehikel (Wissen)

Die datengetriebene Automatisierung benötigt leistungsfähige Datenstrukturen, welche sowohl den kurzfristigen Horizont der Durchführung der konkreten Operationen selbst als auch den langfristigen Horizont im Sinne der Life Cycle Sustainability berücksichtigen. Zusätzlich ist eine Balance zwischen Standardisierung und Use-Case spezifischer Flexibilität notwendig, um Interoperabilität und Komplexität der Implementierung auszutarieren. Hier ist die domänenspezifische Adaption von Datenstrukturen aufbauend auf weiter verbreiteten Standards ein Lösungsansatz. GÖPPERT et al. stellen hierzu eine *Digital Twin Pipeline* vor [43]: Das erste Ziel ist die Erstellung einer domänenspezifischen Ontologie. Zunächst werden für die Domäne allgemein geeignete Standard-Ontologien und Metamodelle analysiert. Diese werden dann mittels Experteninput durch Kombination und/oder konforme Erweiterung an die erwarteten Use-Cases anpasst. Die resultierende Ontologie stellt Syntax und Semantik zur Modellierung der konkreten Use-Cases bereit, ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 10 gezeigt. Aus dieser Modellbeschreibung, welche als Digital Twin interpretiert wird, ist dann zum einen das Deployment eines automatisierten Systems auf Basis generativer Programmierung möglich. Zum anderen kann die Ontologie-basierte Modellierung zum persistenten, wiederverwendbaren und interoperablen Management Use-case bezogener Informationen in Form von Wissen verwendet werden.

GÖPPERT et al. evaluieren die Digital Twin Pipeline für die Steuerung frei verketteter Montagesysteme. In der Referenzimplementierung wird auf MASON und BOT als allgemeine Ontologien aufgebaut, welche mit SOIL und der Asset Administration Shell als Meta-Modellen kombiniert wird. Das in der Beschreibungsphase gewonnene Modell wird mittels JSON als Markup-Sprache abgebildet, sodass dieses anschließend in verschiedenen Softwareumgebungen geladen werden kann [43]. KAVEN et al. integrieren diesen Ansatz

in ein Leitsystem zur frei verketteten Montage eines Batteriepacks. Dabei wird aus dem Digital Twin heraus eine MQTT-basierte, VDA 5050 kompatible Kommunikationsstruktur zwischen Leitsystem und fahrerlosen Transportsystemen generiert [44].

Die Digital Twin Pipeline ist ein entscheidender Enabler zur technologischen Realisierung frei verketteter Montagesysteme. Diese tragen wiederum durch ihre inhärenten Fähigkeiten, Resilienz- und Nachhaltigkeit zu adressieren, zur Life Cycle Sustainability bei [45].

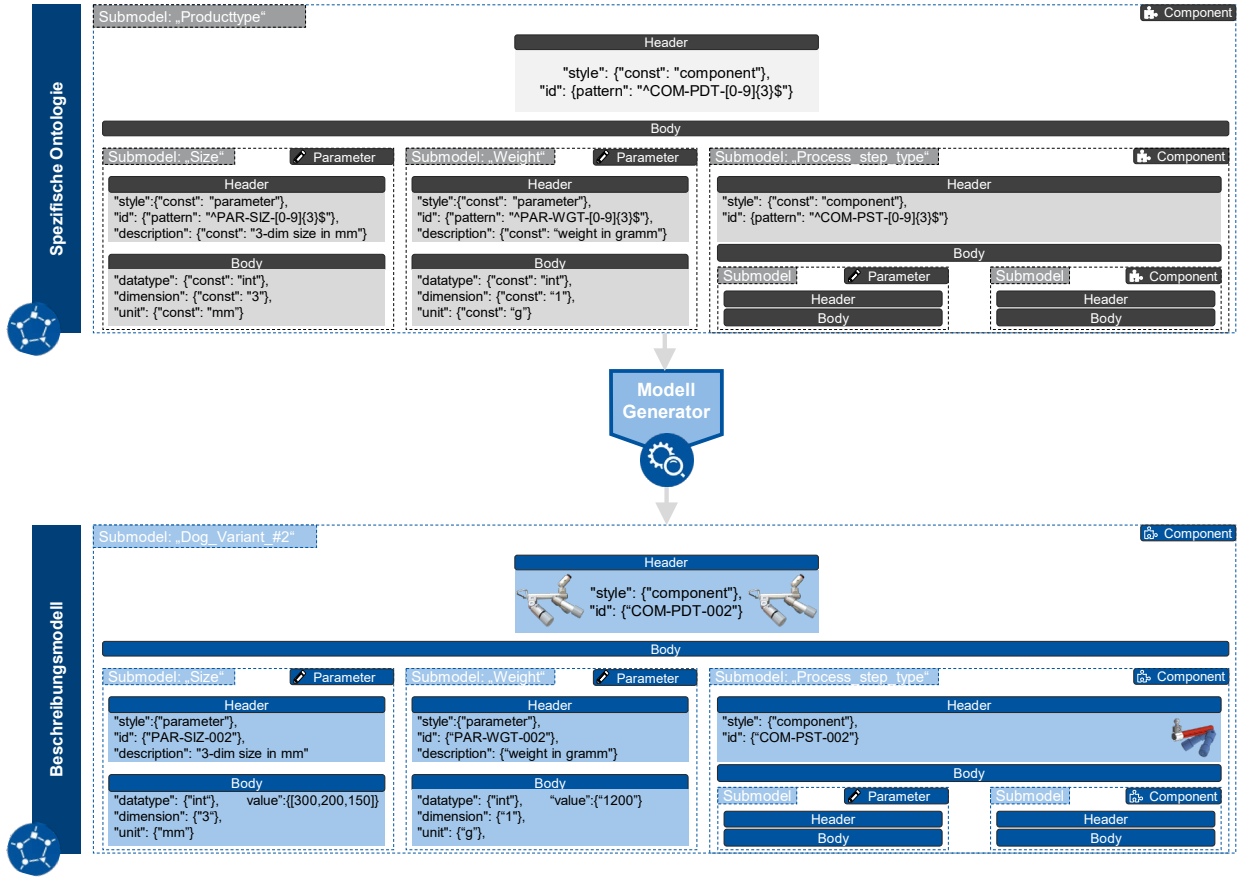


Abbildung 10: Ontologie und daraus basierend formuliertes Beschreibungsmodell für ein zu montierendes Produkt [43]

4.5 Nachhaltigkeits- und Qualitätsmanagement als Synergie (Aktion)

Die Herausforderungen des Nachhaltigkeits- und Qualitätsmanagement lassen sich in die gleichen Dimensionen des normativen, strategischen und operativen Managements nach BLEICHER einordnen [46]. In der Perspektive des Aachener Qualitätsmanagement Modells (ACQMM) spiegelt sich dies in der unternehmerischen Qualität wider, die als *momentane[r] Überdeckungsgrad von Marktanforderungen, Unternehmensausrichtung und Unternehmensfähigkeiten* verstanden wird [47]. Nachhaltigkeitsziele werden dabei zu Marktforderungen. Das ACQMM beinhaltet daneben als zentrales Element den Quality Stream, der den qualitätsbezogenen Wertstrom darstellt und sich am Produktlebenszyklus orientiert. Damit ist eine direkte Anschlussfähigkeit an das Ziel der Life Cycle Sustainabilility gegeben. Qualitäts- und Nachhaltigkeitsmanagement können integriert werden, indem geeignete Strategien zur Erreichung strategischer Nachhaltigkeitsziele und KPIs sowie zur Nachhaltigkeitsbewertung in die Quality Forward bzw. Backward Chain(s) integriert werden.

Abbildung 11 zeigt einen Ansatz zur Einbettung des Nachhaltigkeitsmanagement in das ACQMM. Die Sicht auf den Produktlebenszyklus wird explizit anhand ausgewählter R-Strategien (vgl. Abschnitt 2) fokussiert. Ein zweiter Fokus im eingebetteten Life Cycle Thinking liegt im Datenmanagement, insbesondere der vertikalen und horizontalen Integration.

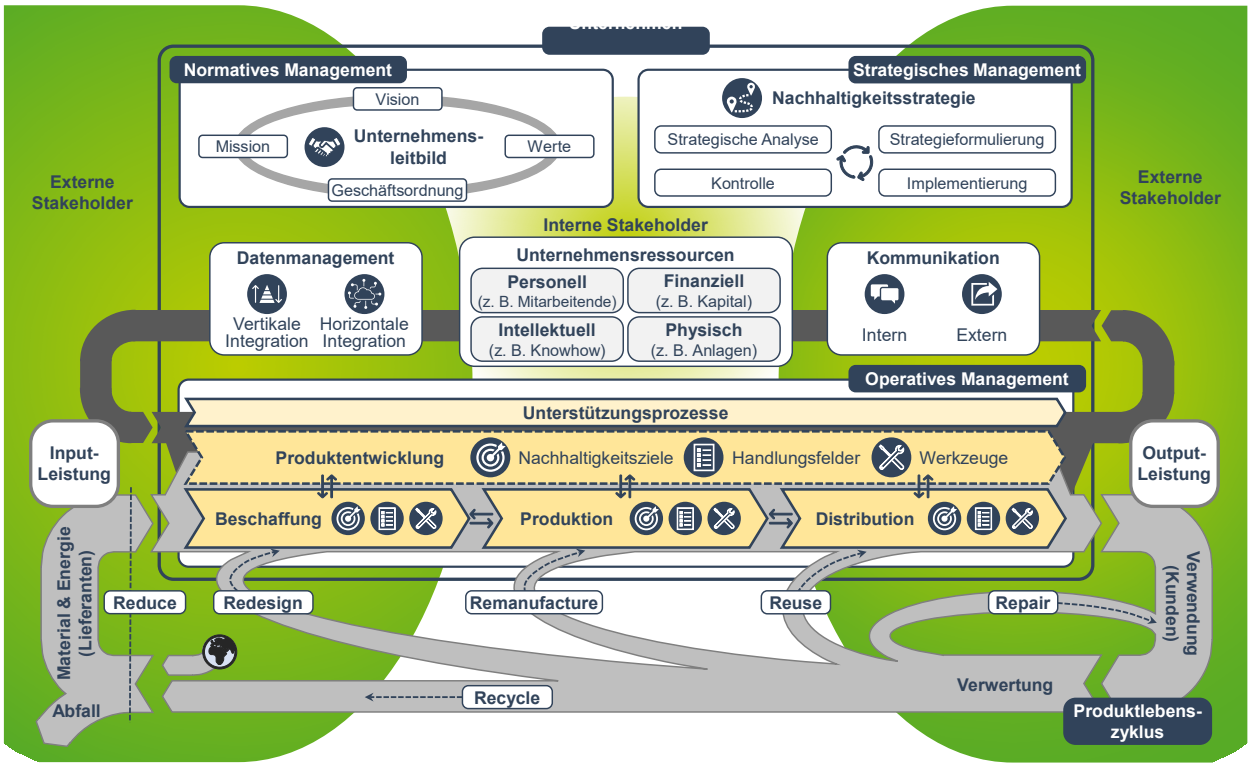


Abbildung 11: Inkorporation von Nachhaltigkeitsstrategien ins Qualitätsmanagement im ACQMM [48]

Aus Sicht der Wissenspyramide ermöglicht die beschriebene Erweiterung des ACQMM, die Aktionsebene in den zuvor genannten Managementdimensionen abzubilden. Dennoch fordern die Komplexität der Lösungsmöglichkeiten sowie die Notwendigkeit einer objektiven Nachhaltigkeitsbewertung eine datengetriebene Entscheidungsfindung, um im Sinne der Life Cycle Sustainability zu agieren. BRIELE et al. konkretisieren diesen datengetriebenen Aspekt und unterstreichen die Bedeutung von Qualitäts- und Nachhaltigkeitsmanagement in der Weiterentwicklung des *Internet of Production* [49].

5 Ausblick

Daten sind ein zentraler Treiber vieler Technologien zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen in der Produktionstechnik. Dabei kommt es nicht nur auf die Erhebung der Daten selbst, sondern vor allem auf die Verarbeitung und Aggregation hin zu Wissen und Aktionen an. Dies wird in der vorgestellten Perspektive der Life Cycle Sustainability besonders fokussiert. Gleichzeitig nehmen die technologische Komplexität und Individualität der notwendigen Prozesse zu, sodass eine resiliente Gestaltung notwendig ist. Um dies zu verdeutlichen, wurde eine angepasste Definition des Resilienzbegriffs für die Life Cycle Sustainability vorgestellt. Insgesamt werden somit konkrete Anforderungen an die zu Grunde liegenden Datenstrukturen und damit verbundene Datenmanagement gestellt.

In der Disziplin des (Forschungs-)Datenmanagements werden die Nachhaltigkeit und Transparenz von Daten und Algorithmen bereits seit geraumer Zeit unter den Prinzipen FAIR (Findable, Accessible, Interpretable, Reusable) und FACT (Fairness, Accuracy, Confidentiality, Transparency) gefordert und untersucht. Diese müssen jedoch auf die Domäne der Produktionstechnik übertragen werden, wie am Beispiel der *SensOr Interfacing Language SOIL* illustriert wird. Das in SOIL verfolgte Prinzip, die domänenspezifische Modellierung von der Implementierung in standardisierten Datenstrukturen bzw. Kommunikationsprotokollen zu entkoppeln steht dabei stellvertretend für die Maxime, dass die domänenspezifische Adaption weit verbreiteter Standards wichtiger ist als die Initiierung einer großen Zahl spezifischer Einzelstandards – hierdurch profitieren nicht zuletzt auch Interoperabilität und Automatisierung.

Insgesamt kann das Produktionsdatenmanagement als neues Handlungsfeld für die erfolgreiche Gestaltung einer grünen Produktion festgehalten werden. Dieses steht jedoch nicht für sich, sondern muss eng mit den jeweiligen Domänen verbunden werden, wie für Qualitäts- und Informationsmanagement, Metrologie, Kommunikationsstechnologie, Automatisierung und Qualifikation von Mitarbeiter:innen skizziert wurde. Die Etablierung geeigneter Datenstrukturen orientiert sich dabei unter anderen an folgenden Leitfragen, die zur Übertragung der gezeigten Lösungsbausteine auf neue Anwendungen genutzt werden können:

- Welche konkreten Nachhaltigkeitsziele sollen verfolgt werden?
- Welche Strategien zur Erreichung dieser Ziele in den Dimensionen Mensch, Organisation und Technik sollen eingesetzt werden?
- Welche Daten und Informationen werden (voraussichtlich) benötigt werden?
- Welche Stakeholder sind über den gesamten Lebenszyklus beteiligt?
- Welche Standarddatenstrukturen können domänenspezifisch adaptiert werden?

Mit Hilfe eines starken Produktionsdatenmanagement kann es in Zukunft gelingen, die *Megatrends Nachhaltigkeit*, *Resilienz und Digitalisierung* in der Produktionstechnik synergetisch und gesellschaftlich gewinnbringend zu vereinen. Hierzu müssen in der technologischen Ausgestaltung sowie Forschung- und Entwicklung die Systemgrenzen des Datenmanagements aus dem gesamten Betrachtungshorizont der Life Cycle Sustainabi-lity abgeleitet werden. Dies bestärkt einen interdisziplinär und interoperabel vernetzten Ansatz, welcher sich in der Vision des *Internet of Sustainable Production* widerspiegelt.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2023 Internet of Production – 390621612.

6 Literatur

[1] R. H. Schmitt, N. König, S. Jung und M. Peterek, „Architektur einer vernetzten, adaptiven Produktion," in *Internet of Production - Turning Data into Sustainability: AWK'21,* T. Bergs, C. Brecher, R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2021, S. 31-48.

[2] E. Kristoffersen, F. Blomsma, P. Mikalef und J. Li, „The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies," *Journal of Business Research*, Jg. 120, S. 241–261, 2020, doi: 10.1016/j.jbusres.2020.07.044.

[3] European Commission. „European industrial strategy." commission.europa.eu. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy_en (Zugriff am: 7. Feb. 2023).

[4] A. Nassehi, M. Colledani, B. Kádár und E. Lutters, „Daydreaming factories," *CIRP Annals*, Jg. 71, Nr. 2, S. 671–692, 2022, doi: 10.1016/j.cirp.2022.05.002.

[5] Statista Research Department. „CO2-Emissionen weltweit in den Jahren 2960 bis 2021 (in Millionen Tonnen)." de.statista.com. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/ (Zugriff am: 7. Feb. 2023).

[6] The Climate Pledge. „Be the planet's turning point." theclimatepledge.com. https://www.theclimatepledge.com/us/en (Zugriff am: 7. Feb. 2023).

[7] M. Benfer, B. Verhaelen, S. Peukert und G. Lanza, „Resilience Measures in Global Production Networks: A Literature Review and Conceptual Framework," *Die Unternehmung*, Jg. 75, Nr. 4, S. 491–520, 2021, doi: 10.5771/0042-059X-2021-4-491.

[8] A. Nowroth und D. Dittmer. „"Lieferketten werden sich nachhaltig verändern": Hohe Frachtpreise als "Bumerang"." n-tv.de. https://www.n-tv.de/wirtschaft/Made-in-Europe-wird-attraktiver-Hohe-Frachtpreise-veraendern-Lieferketten-article22974356.html (Zugriff am: 7. Feb. 2023).

[9] „Die Produktionswende - Turning Data into Sustainability: Durch das Internet of Production zu nachhaltiger Produktion und Betrieb," W. Boos, Aachen, 2021. Zugriff am: 7. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wzl.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaabapamly&download=1

[10] M. Finkbeiner, E. M. Schau, A. Lehmann und M. Traverso, „Towards Life Cycle Sustainability Assessment," *Sustainability*, Jg. 2, Nr. 10, S. 3309–3322, 2010, doi: 10.3390/su2103309.

[11] „Integrated Product Policy: Building on Environmental Life-Cycle Thinking," Commission of the European Communities, Brüssel, 2003. Zugriff am: 7. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52003DC0302&from=EN

[12] „Towards a Life Cycle Sustainability Assessment," A. Ciroth *et al.*, Paris, 2011. Zugriff am: 7. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20Towards%20LCSA.pdf

[13] S. Kara, M. Hauschild, J. Sutherland und T. McAloone, „Closed-loop systems to circular economy: A pathway to environmental sustainability?," *CIRP Annals*, Jg. 71, Nr. 2, S. 505–528, 2022, doi: 10.1016/j.cirp.2022.05.008.

[14] J. Kirchherr, D. Reike und M. Hekkert, „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions," *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 127, S. 221–232, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

[15] A. Granskog, E. Hannon, S. Hieronimus, M. Klaeyle und A. Winkle. „How companies capture the value of sustainability: Survey findings." mckinsey.com. https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/how-companies-capture-the-value-of-sustainability-survey-findings#/download/%2F~%2Fmedia%2Fmckinsey%2Fbusiness%20functions%2Fsustainability%2Four%20insights%2Fhow%20companies%20capture%20the%20value%20of%20sustainabil-ity%20survey%20findings%2Fhow-companies-capture-the-value-of-sustainability-survey-findings-vf.pdf (Zugriff am: 2. Feb. 2023).

[16] F. Sohnius, M. Iglauer, L. C. Gussen und R. H. Schmitt, „Quantification of sustainability in production systems through a conceptual input-output model," *Procedia CIRP*, in Veröffentlichung.

[17] L. Hingst, Y.-B. Park und P. Nyhuis, „Life Cycle Oriented Planning Of Changeability In Factory Planning Under Uncertainty," in *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2021*, D. Herberger und M. Hübner, Hg., 2021, S. 11-22, doi: 10.15488/11276.

[18] A. Khan und K. Turowski, „A Survey of Current Challenges in Manufacturing Industry and Preparation for Industry 4.0," in *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'16)* (Advances in Intelligent Systems and Computing), 2016, S. 15–26, doi: 10.1007/978-3-319-33609-1_2.

[19] M. D. Wilkinson *et al.,* „The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship," *Scientific data*, Jg. 3, 2016, Art.-Nr. 160018, doi: 10.1038/sdata.2016.18.

[20] T. Tanhua *et al.,* „Ocean FAIR Data Services," *Frontiers in Marine Science*, Jg. 6, 2019, Art.-Nr. 440, doi: 10.3389/fmars.2019.00440.

[21] W. M. P. van der Aalst, M. Bichler und A. Heinzl, „Responsible Data Science," *Business & Informations Systems Engineering*, Jg. 59, Nr. 5, S. 311–313, 2017, doi: 10.1007/s12599-017-0487-z.

[22] M. M. Khan und J. Vice, „Toward Accountable and Explainable Artificial Intelligence Part One: Theory and Examples," *IEEE Access*, Jg. 10, S. 99686–99701, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3207812.

[23] M. Bodenbenner, B. Montavon und R. H. Schmitt, „Model-driven development of interoperable communication interfaces for FAIR sensor services," *Measurement: Sensors*, Jg. 24, Art.-Nr. 100442, 2022, doi: 10.1016/j.measen.2022.100442.

[24] M. Bodenbenner, B. Montavon und R. H. Schmitt, „FAIR sensor services - Towards sustainable sensor data management," *Measurement: Sensors*, Jg. 18, Art.-Nr. 100206, 2021, doi: 10.1016/j.measen.2021.100206.

[25] P. Groth, H. Cousijn, T. Clark und C. Goble, „FAIR Data Reuse – the Path through Data Citation," *Data Intellegence*, Jg. 2, Nr. 1-2, S. 78–86, 2020, doi: 10.1162/dint_a_00030.

[26] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari und M. Ayyash, „Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Commununications Surveys & Tutorials*, Jg. 17, Nr. 4, S. 2347–2376, 2015, doi: 10.1109/comst.2015.2444095.

[27] „Industrie 4.0: Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland: Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0," S. Wischmann, L. Wangler und A. Botthof, Berlin, 2015. Zugriff am: 6. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://vdivde-it.de/system/files/pdfs/industrie-4.0-volks-und-betriebswirtschaftliche-faktoren-fuer-den-standort-deutschland.pdf

[28] F. Liu, W. K. Ng und W. Zhang, „Encrypted SVM for Outsourced Data Mining," in *2015 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing (CLOUD 2015): New York City, New York, USA, 27 June - 2 July 2015*, C. Pu, Hg., 2015, doi: 10.1109/cloud.2015.158.

[29] B. Otto, M. ten Hompel und S. Wrobel, „Industrial Data Space: Referenzarchitektur für die Digitalisierung der Wirtschaft," in *Digitalisierung: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft*, R. Neugebauer, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018, S. 113–133.

[30] M. d. C. Silva, D. d. A. Santos, P. S. Carvas und C. F. S. Gomes, „Intellectual Property and Patenting Software Period 2012 - 2017," *International Journal of Human Capital and Information Technology Professionals*, Jg. 11, Nr. 2, S. 64–78, 2020, doi: 10.4018/IJHCITP.2020040105.

[31] J. Goldenfein, „Algorithmic Transparency and Decision-Making Accountability: Thoughts for Buying Machine Learning Algorithms," *SSRN,* 2019.

[32] JCGM. „Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement." bipm.org. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6 (Zugriff am: 2. Feb. 2023).

[33] R. Schmitt *et al.*, „Industrie 4.0: Konzept der resilienten Fabrik," in *Integrative Produktion: Industrie 4.0: Aachener Perspektiven,* C. Brecher, F. Klocke, R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2014, S. 427-449.

[34] „VDE Positionspapier "Resiliente Netze mit Funkzugang"," G. P. Fettweis *et al.*, Frankfurt am Main, 2017. Zugriff am: 7. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://shop.vde.com/de/vde-positionspapier-resiliente-netze-mit-funkzugang

[35] P. Mohanram, A. Passarella, E. Zattoni, R. Padovani, N. König und R. H. Schmitt, „5G-Based Multi-Sensor Platform for Monitoring of Workpieces and Machines: Prototype Hardware Design and Firmware," *Electronics*, Jg. 11, Nr. 10, Art.-Nr. 1619, 2022, doi: 10.3390/electronics11101619.

[36] P. Kehl *et al.,* „Prototype of 5G Integrated with TSN for Edge-Controlled Mobile Robotics," *Electronics*, Jg. 11, Nr. 11, Art.-Nr. 1666, 2022, doi: 10.3390/electronics11111666.

[37] R. Kiesel *et al.,* „Techno-Economic Evaluation of 5G-NSA-NPN for Networked Control Systems," *Electronics*, Jg. 11, Nr. 11, Art.-Nr.. 1736, 2022, doi: 10.3390/electronics11111736.

[38] M. Bodenbenner, P. M. Sanders, B. Montavon und R. H. Schmitt, „Multiprotokollfähiges Meta-Datenmodell," *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 112, Nr. 11-12, S. 788-791, 2022, doi: 10.37544/1436-4980-2022-11-12-62.

[39] B. Montavon, M. Peterek und R. H. Schmitt, „Communication architecture for multiple distributed large volume metrology systems," in *2017 IEEE International Symposium on Systems Engineering: ISSE 2017: Vienna, Austria, October 11-13, 2017: 2017 symposium proceedings*, 2017, doi: 10.1109/SysEng.2017.8088326.

[40] B. Montavon, M. Peterek und R. H. Schmitt, „Model-based interfacing of large-scale metrology instruments," in *Multimodal Sensing: Technologies and Applications: 26-27 June 2019, Munich, Germany*, E. Stella, Hg., 2019, Art.-Nr. 10590C, doi: 10.1117/12.2527461.

[41] M. Bodenbenner, M. P. Sanders, B. Montavon und R. H. Schmitt, „Domain-Specific Language for Sensors in the Internet of Production," in *Production at the leading edge of technology: Proceedings of the 10th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Dresden, 23-24 September 2020* (Lecture Notes in Engineering), B.-A. Behrens, A. Brosius, W. Hintze, S. Ihlenfeldt und J. P. Wulfsberg, Hg., Berlin, 2021, S. 448–456, doi: 10.1007/978-3-662-62138-7_45.

[42] N. Mehrabi, F. Morstatter, N. Saxena, K. Lerman und A. Galstyan, „A Survey on Bias and Fairness in Machine Learning," *ACM Computing Surveys*, Jg. 54, Nr. 6, Art.-Nr. 115, 2022, doi: 10.1145/3457607.

[43] A. Göppert, L. Grahn, J. Rachner, D. Grunert, S. Hort und R. H. Schmitt, „Pipeline for ontology-based modeling and automated deployment of digital twins for planning and control of manufacturing systems," *Journal of Intelligent Manufacturing*, Online first, 2021, doi: 10.1007/s10845-021-01860-6.

[44] L. Kaven, E. Abele, A. Göppert und R. H. Schmitt, „Digital Twin Pipeline zur VDA-5050-Integration: Ein standardisierter Ansatz für die automatisierte Implementie-rung der flexiblen Produktion," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 117, Nr. 5, S. 327–331, 2022, doi: 10.1515/zwf-2022-1057.

[45] R. H. Schmitt *et al.,* „Future Assembly - Automation Beyond Mass Production," in *Internet of Production - Turning Data into Sustainability: AWK'21,* T. Bergs, C. Brecher, R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2021, S. 176–199.

[46] C. Abegglen und K. Bleicher, *Das Konzept Integriertes Management: Visionen - Missionen - Programme,* 10. Aufl. Frankfurt am Main, New York: Campus, 2021.

[47] R. H. Schmitt, C. Lenkewitz und C. Behrens, „Unternehmerisch umgesetzt: das neue Aachener Qualitätsmanagement-Modell," *Management & Qualität*, Jg. 37, Nr. 11, S. 16–18, 2007.

[48] F. Sohnius, M. Iglauer und R. H. Schmitt, „Design model for the sustainability management of manufacturing companies," in *Proceedings of 18th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, in Veröffentlichung.

[49] K. Briele *et al.,* „Internet of Sustainability – Data-Driven Sustainability Management in Production," in *Production at the Leading Edge of Technology: Proceedings of the 11th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Dresden, September 2021* (Lecture Notes in Production Engineering), B.-A. Behrens, A. Brosius, W.G. Drossel, W. Hintze, S. Ihlenfeldt und P. Nyhuis, Hg., 2022, S. 639–647, doi: 10.1007/978-3-030-78424-9.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 1.1:

Matthias Bodenbenner, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Hanna Brings, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Dr.-Ing. Benjamin Montavon, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen

1.2 Schließen des Kreislaufs mit adaptiver automatisierter Demontage

R. H. Schmitt, A. Göppert, F. Sohnius, M. Frye, J. Elsner, K. Briele, L. Bergs, F. Balzereit, J. Bitter-Krahe, M. Drechsel, I. Geyer, T. Greshake, T. Häring, D. Mishra, C. Kokott, G. Nilgen, S. Schmitt

Gliederung

1 Einleitung 66

2 Remanufacturing für die Kreislaufwirtschaft 67
2.1 Entwicklung der Kreislaufwirtschaft aus der Linearwirtschaft 67
2.2 Potenziale und Herausforderungen des Remanufacturing 69

3 Demontage für wirtschaftliches Remanufacturing 70
3.1 Zielbild eines wirtschaftlichen Demontagesystems 70
3.2 „Design for Disassembly“ - Produkttechnologie als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme 72
3.3 Robotische Automatisierung, KI-Entwicklung & Sensortechnik -Prozesstechnologien als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme 73
3.4 Linienlose Montage - Systemtechnologie als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme 75

4 Use Cases 76
4.1 Refurbishmentprozesse für Second-Life Waschmaschinen 77
4.2 Demontage von PKW-Batteriekästen 80
4.3 Remanufacturing von Freizeitschuhen 83
4.4 Zusammenfassung des aktuellen Status Quo aus Sicht der Unternehmen 87

5 Fazit 87

6 Literatur 90

doi: 10.24406/publica-959

Kurzfassung

Schließen des Kreislaufs mit adaptiver automatisierter Demontage

Mit der Einführung von gesellschaftlichen und politischen Vorgaben wie dem „European Green Deal“ wird die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zur Unternehmensaufgabe. Deren wirtschaftliche Umsetzung erfordert jedoch die Anpassung industrieller Prozessabläufe hinsichtlich des angestrebten Grades an Adaptivität an eine dann zunehmende Varianz von Eingangsmaterialien in die industrielle Wertschöpfung. Strategien wie das Remanufacturing bieten nicht nur ein ökologisches Potenzial, sondern bewirken eine Steigerung der Resilienz und eröffnen dadurch neue wirtschaftliche Geschäftsperspektiven. Innerhalb des Beitrags wird die Bedeutung geeigneter Demontagesysteme für die Kreislaufwirtschaft aufgezeigt. Aufbauend auf den spezifischen Herausforderungen der Kreislaufstrategien wird ein Zielbild für wirtschaftliche Demontagesysteme abgeleitet. Drei industrielle Use Cases zeigen verschiedene Ausprägungen solcher Systeme auf. Es besteht der Bedarf, die Demontage zu automatisieren und gleichzeitig die Adaptivität des Systems zu maximieren, um verschiedenen Produktzuständen gerecht zu werden. Die adaptive automatisierte Demontage stellt hierfür die zentrale Befähigung dar. Zur Umsetzung dienen Befähigertechnologien wie der Einsatz von Sensorik und KI, aber auch das „Design for Disassembly“. Aus organisatorischer Perspektive sind Standardisierungen notwendig, um die Verfügbarkeit von Daten sowohl aus der Produktion, dem User-Zyklus als auch aus automatisierten Zustandsbewertungen als ein Entscheidungsfundament für adaptive Prozesse nutzbar zu machen. Die Bereitstellung und Analyse der notwendigen Daten stellt folglich ein zentrales Anliegen für die Umsetzung der Demontageprozesse dar.

Schlagwörter: Demontage, Automatisierung, Adaptivität, Resilienz, Kreislaufwirtschaft

Abstract

Closing the Loop with Adaptive Automated Disassembly

With the introduction of social and political requirements such as the "European Green Deal", the implementation of the circular economy is becoming a corporate task. However, its economic implementation as an answer to regulatory demands requires the adaptation of industrial processes regarding the desired degree of adaptivity to a then increasing variance of input materials in industrial value creation. Strategies such as re-manufacturing not only offer ecological potential, but also bring about an increase in resilience and thus open new economic business perspectives. Within the contribution, the importance of suitable disassembly systems including dismantling abilities for the circular economy is shown. Based on the specific challenges of the circular strategies, a target picture for economic disassembly systems is derived. Three industrial use cases show different forms of such systems. There is a need to automate disassembly while maximizing the adaptivity of the system to cope with different product states. Adaptive automated disassembly is the key enabler for this. Enabling technologies such as the use of sensors, AI or "design for disassembly", serve to implement this. From an organizational perspective, standardization is necessary to make data from production, from the user cycle and from automated condition assessments available and usable as a decision-taking foundation for adaptive processes. Consequently, the provision and analysis of the necessary data represents a central concern for the implementation of disassembly processes.

Keywords: Disassembly, automation, adaptivity, resilience, circular economy

1 Einleitung

Bisherige Wirtschaftsmodelle unserer Gesellschaft orientieren sich vor allem an einem linearen Aufbau, bei dem Produkte nach der Nutzung entsorgt werden [1]. Die Endlichkeit von Ressourcen stellt jedoch eine steigende Problematik dar: Der weltweite Ressourcenbedarf hat sich in den letzten fünfzig Jahren nahezu vervierfacht [2]. So kommt es, dass die Hälfte aller Treibhausgasemissionen und mehr als 90 % des Verlusts biologischer Vielfalt auf die Gewinnung und Verarbeitung von Ressourcen zurückzuführen sind [3]. Im Zuge des European Green Deals [4] und dem Ziel der Klimaneutralität bis 2050 hat die EU Kommission im Frühjahr 2022 eine Reihe von Vorschlägen gemacht, um kreislaufbasierte Geschäftsmodelle zu fördern [5]. Der „Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft“ sieht vor, dass nahezu alle physischen Waren für ihren gesamten Lebenszyklus nicht nur energieeffizienter, sondern explizit kreislauffähiger – also für die Wiederverwendung als Sekundärressourcen – gestaltet sein müssen [3], [5]. Anforderungen, wie eine vereinfachte Wartung, Aufarbeitung und Recycling der Produkte, werden somit in Vorschriften verankert. So wird die Idee einer „echten Kreislaufwirtschaft in der EU“ durch konkrete Produktmaßnahmen umgesetzt [5].

Allerdings verwendet das globale Wirtschaftssystem im Jahr 2022 Ressourcen nur zu 7,2 % zirkulär; in Deutschland werden nur 12 % der Sekundärrohstoffe wieder in der Wirtschaft eingesetzt [3], [6]. Es bietet sich somit eine enorme Lücke, die durch Lebensverlängerung der Ressourcen als Sekundärrohstoffe – wie z. B. im Remanu-facturing mit Eröffnung eines neuen Lebenszyklus bei Werterhaltung oder -steigerung – zu schließen ist [6]. Neben dem Umgang mit der Rohstoffverknappung sind mögliche Einsparpotenziale, die Erfüllung der Kundenforderungen und die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit Treiber für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft [7].

Zur Nutzung des Ressourcenpotenzials müssen nicht nur die Produkte entsprechend entwickelt sein, sondern auch auf Prozess- und Systemebene müssen die Strategien der Kreislaufwirtschaft wirtschaftlich und technisch umgesetzt werden [8]. Neben der Rückführungslogistik stellt vor allem die Demontage der Produkte eine Herausforderung dar [8], [9]. So kann die Demontage in Remanufacturing-Prozessen nicht als einfache Umkehr der Montagetätigkeiten verstanden werden, sondern zeichnet sich durch große Variantenvielfalt sowie durch schwankende Produktzustände und Stückzahlen aus [8]. Trotz der Variationen müssen die hohen Ansprüche an Skalierbarkeit dermaßen erfüllt werden, dass gleichzeitig ein reproduzierbarer Umgang mit der Vielzahl an Unsicherheiten ermöglicht wird [9]. Gelingt es, dieses Spannungsfeld aufzulösen, ist dies ein Schlüssel, um das benötigte Potenzial der Sekundärressourcen für eine nachhaltigere Produktion wirtschaftlich erfolgreich nutzen zu können. Den hierfür notwendigen Umbruch in der Produktionsgestaltung gilt es, aktiv durch Konzepte und Technologien zu unterstützen.

Dieser Beitrag zeigt auf, wie Demontagesysteme eine Rückführung von Materialien und Komponenten in die Kreislaufwirtschaft ermöglichen. Zunächst werden die „R“-Strategien der Kreislaufwirtschaft von Recycling bis Reuse diskutiert und die Notwendigkeit für ein industrielles Re-Manufacturing dargelegt. Dazu wird ein Zielbild eines wirtschaftlichen Demontagesystems sowie die vier zentralen Eigenschaften Demontagetiefe, Zerstörungsgrad, Prozess- und Systemadaptivität vorgestellt und die dazugehörigen Technologien erläutert. Anhand der Anwendungsfälle Waschmaschinen (Miele & Cie. KG), PKW-Batteriekästen (Ford Werke GmbH) und Freizeitschuhen (PCH Innovations) wird die Breite möglicher Anwendungen gezeigt. Abschließend werden die Gemeinsamkeiten diskutiert und übergeordnete Handlungsfelder aufgezeigt.

2 Remanufacturing für die Kreislaufwirtschaft

Aufgrund der vorgestellten Herausforderungen zur Ressourcenverfügbarkeit stellt die Dimension „Nachhaltigkeit“ eine wichtige Erweiterung zu den Optimierungszielen der Produktion dar [10]. Nachhaltigere Geschäftsmodelle setzen voraus, dass der Fokus von der Produktion auf den kompletten Lebenszyklus und insbesondere auf das Produktlebensende (engl.: „End-of-Life“) ausgeweitet werden muss [10], [11]. Eine nachhaltige industrielle Kreislaufwirtschaft endet nicht an den Werkstoren, sondern bezieht den Anwendungs-Zyklus mit ein. Insbesondere die Rückgewinnung von Ressourcen stellt ein zentrales Anliegen dar [11]. Allerdings unterscheidet sich das Ressourcenverständnis in den verschiedenen Konzepten, welche nachfolgend erläutert werden.

2.1 Entwicklung der Kreislaufwirtschaft aus der Linearwirtschaft

Ein nachhaltiges Wirtschaftssystem zeichnet sich durch eine ganzheitliche Betrachtungsweise aus, in der die Umwelteinwirkungen, die durch die Nutzung von Ressourcen entstehen, hinterfragt werden. Für eine vollständige Analyse ist daher der gesamte Produktlebenszyklus zu berücksichtigen [10]. Konventionell werden Produkte in einem linearen Wirtschaftsmodell betrachtet: Rohstoffe werden gefördert, um aus diesen Rohstoffen wiederum Produkte herzustellen. Das Produkt wird so entwickelt, dass es nach Ablauf der Lebensdauer zu Abfall wird [1], [12], [13]. Dieser einmalig durchlaufende Lebenszyklus wird auch als „Cradle-to-Grave“ bezeichnet [12].

Gestaltungsoptionen für eine nachhaltige Produktion ergeben sich aus den drei Konzepten Effizienz, Konsistenz und Suffizienz. Effizienzmaßnahmen – also eine vorteilhaftere Nutzung eingesetzter Ressourcen im Verhältnis zum produzierten Output – sind aus ökologischer und ökonomischer Perspektive eine kontinuierliche Verbesserungsaufgabe [14], [15]. Allerdings führen Effizienzmaßnahmen nur zur Abmilderung von negativen Effekten, z. B. zu Materialeinsparungen, aber nicht zur Problembeseitigung [16]. Stattdessen kann die Effektivität verbessert werden, indem neue Konzepte umgesetzt werden (Konsistenz-Ansatz): Der Produktlebenszyklus wird hierbei durch verschiedene Strategien verlängert, um Ressourcen möglichst lange und häufig wiederzuverwenden. Dieses Konzept ist als Kreislaufwirtschaft bzw. „Circular Economy“ bekannt. [17]–[19] Visionäres Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, Nutzungszyklen vollständig, ohne die Erzeugung von Abfällen zu etablieren. Charakteristische Eigenschaften sind die ganzheitliche Perspektive, eine vollständige Wiederverwertbarkeit der Materialien und der Einsatz von erneuerbaren Energien. [20], [21] Dies kann dann auch aus wirtschaftlicher Perspektive vorteilhaft sein. Insbesondere Design-Konzepte, die den gesamten Produktlebenszyklus vorausschauend gestalten, erfüllen eine wichtige Aufgabe [16].

In der Literatur werden unterschiedliche Typen von Strategien benannt, die die Rückgewinnung von Ressourcen, deren Aufwertung und die Ermöglichung weiterer Lebenszyklen thematisieren [22]–[24]. So definieren POTTING *ET AL.* insgesamt 10 verschiedene „R-Strategien“ [22]. Einige ausgewählte Begriffe der R-Strategien werden für die weitere Ausarbeitung aufgeführt (siehe Abbildung 1):

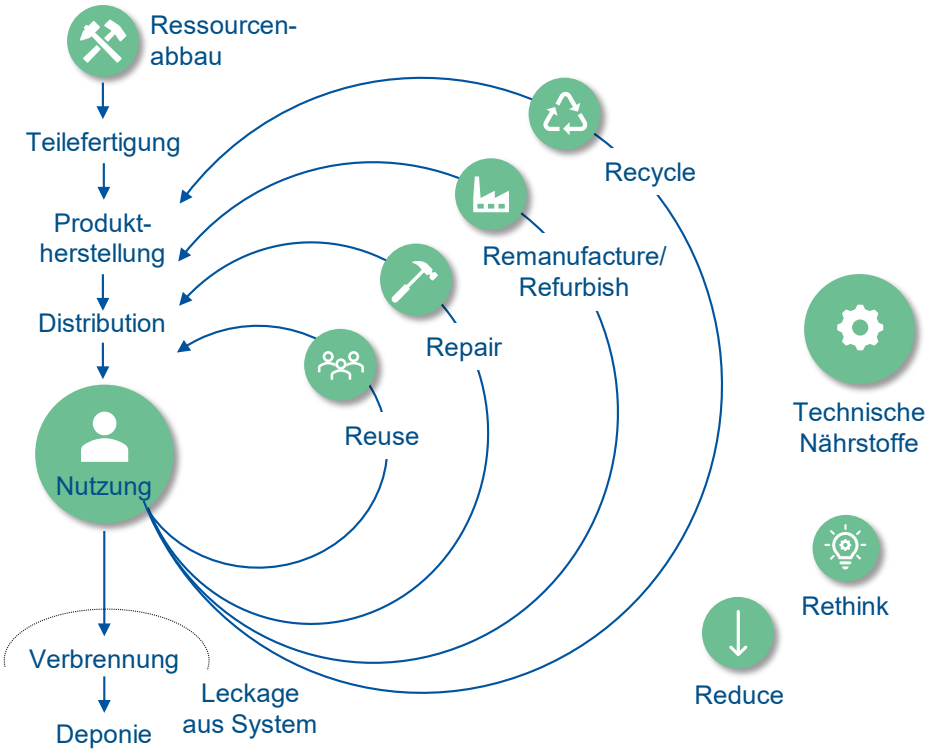


Abbildung 1: Industrielle Ressourcennutzung in der Kreislaufwirtschaft; in Anlehnung an [23]

Die am weitesten etablierte R-Strategie ist das „Recycling“ [16]. Als Recycling bezeichnet man den Prozess der stofflichen Wiederaufbereitung von Wertstoffen [22], [25]. Das Material verliert in diesem Prozess jedoch seine ursprüngliche Funktion und Form. Das Produkt muss daher über die Materialphase zurück in die Nutzungsphase geführt werden, sodass viele Prozessschritte erneut durchgeführt und Ressourcen aufgewendet werden müssen. Daher ist ein „längerer“ Weg bis zur erneuten Nutzung zu durchlaufen. [26]

Im Gegensatz dazu ist „Reuse“ als Strategie mit geringem zusätzlichen Material- und Energieaufwand zu nennen. Unter Reuse versteht man die Wiederverwendung von einem Produkt, nachdem es von einem anderen Konsumenten nach der ersten Nutzungsphase ausrangiert worden ist [22]. Im Vergleich zur vorherigen Strategie des Recyclings nimmt das Produkt also einen sehr viel „kürzeren“ Weg bis in die erneute Nutzungsphase. Die Strategie „Repair“ wiederum beinhaltet den zusätzlichen Weg der Reparatur bzw. Wartung eines defekten Produkts, um die ursprüngliche Funktion wiederherzustellen, bevor es erneut im Markt zur Nutzung zur Verfügung steht [22].

Sollte das Reparieren nicht möglich sein, können anstatt materialerhaltender Tätigkeiten in Form des Recyclings weitere werterhaltende Maßnahme genutzt werden [26]: Beim „Refurbishment“ wird ein Produkt wieder auf den neuesten Stand aufbereitet. Das „Remanufacturing“ beschreibt das Zusammenspiel aus Prozessen zur Demontage auf Modul- bzw. Komponentenebene, um daraus neue Produkte herzustellen. Wenn die Wiederaufbereitung nicht mehr den notwendigen Funktionslevel erreichen kann, so werden die ausrangierten Güter in Produkten mit anderer Funktionalität eingesetzt. [22] Diese aufgezählten Möglichkeiten sind für die industrielle Nutzung von großem Interesse. Dabei spielt nicht nur der Beitrag zur Kreislaufwirtschaft eine Rolle, sondern auch die Aussichten, Funktionalitätserweiterungen anzubieten und wertschöpfend tätig zu sein. Für die Umsetzung der vorgestellten Strategien sind verschiedene Arbeiten durchzuführen: Generell

erfolgt zunächst meist eine Zustandsbewertung. Basierend auf dem tatsächlich festgestellten Zustand des Produkts erfolgt dann die Demontage. Die Komponenten werden für den erneuten Einsatz aufbereitet, ggf. ersetzt und entweder im ursprünglichen oder in neuen Produkten remontiert. Qualitätsprüfungen vervollständigen die Prozesskette. [16], [26], [27]

Wie in Abbildung 1 verdeutlicht, sind generell „Strategien kürzerer Wege“ zu bevorzugen, weil eine schnellere erneute Produktnutzung und ein verringerter Ressourcenverbrauch erreicht werden können [22]. Für ganzheitliche ökologische und ökonomische Vorteile durch R-Strategien muss zudem sichergestellt sein, Problemverlagerungen im Lebenszyklus zu vermeiden [28].

2.2 Potenziale und Herausforderungen des Remanufacturing

Nach einer Studie von PARKER *ET AL.* wird für die EU bis zum Jahr 2030 das Marktpotenzial von Remanufacturing auf bis zu 90 Mrd. € bewertet [29]. Vor allem die hohe Flexibilität bei der Komponentenverwendung der verschiedenartigsten Produkte und mit gegebenenfalls neuem Technologiestandard ist von Interesse [30], [31]. Sowohl das Refurbishment als auch das Remanufacturing stellt aus Sicht der industriellen Produktion ein großes, zu förderndes Potenzial dar, mit dem Ressourcen für eine nachhaltige Produktion zurückgewonnen und zusätzliche Geschäftsfelder erschlossen werden können [29], [30]. Für die Implementierung von R-Strategien im industriellen Kontext sind wirtschaftliche und ökologische Geschäftsmodelle unabdingbar. Hierfür sind einige Herausforderungen zu lösen:

- Gebrauchte Produkte müssen durch die entsprechend zu etablierenden Redistributionswege gesammelt werden [16], [26].
- Produkte sind häufig nicht demontagegerecht konstruiert, sodass die wirtschaftliche Demontage und Wiederherstellung erschwert ist [12], [26], [27].
- Die hohe Variantenvielfalt einiger Produktgruppen führt zu zusätzlicher Komplexität im Remanufacturing Prozess [32].
- Auch die unterschiedlichen Nutzungszeiten bis zur Rückführung und den folglich verschiedenen Technologien bei der Demontage muss begegnet werden [33].
- Eine Hürde für den weiteren industriellen Ausbau stellen insbesondere die hohen Lohnkosten, z. B. durch die manuelle Demontage, dar [29].
- Als zentrale Schwierigkeit muss eine Erfassung der tatsächlichen Beanspruchung der Komponenten über den gesamten Lebenszyklus ermöglicht werden, um die passenden Aufbereitungsprozesse effizient durchführen zu können [27], [34].

Eine wirtschaftliche Gestaltung der Strategien kann über die Automatisierung mit den Möglichkeiten zur Skalierung und Kapazitätserweiterungen erreicht werden [35]. Gleichzeitig stellen viele der aufgeführten Herausforderungen auch besondere Aufgaben für die Automatisierung in linearer Verkettung, insbesondere für die Demontagesysteme, dar [36]. Zudem fehlen erprobte Systeme, die die benötigte Flexibilität und Wandlungsfähigkeit für produktindividuelle Verwendungswege ermöglichen können. Es besteht ein Bedarf, die Szenarien an industriellen Anwendungsbeispielen zu validieren.

3 Demontage für wirtschaftliches Remanufacturing

Die Demontage ist ein zentraler Bestandteil des Remanufacturing. Sie ermöglicht es, das Produkt in seine Einzelteile zu zerlegen, sodass diese überprüft und gegebenenfalls repariert oder ersetzt werden können. Während die Montage als Sicherstellung der Funktionsfähigkeit eines Produktes durch das Zusammenfügen aller Komponenten definiert ist, beschreibt die Demontage den Prozess, Baugruppen, Bauteile oder Materialien aus einem Mehrkörpersystem für die weitere Verwendung oder Wiederaufbereitung zu gewinnen. [37] Obwohl Montage und Demontage ähnliche und teilweise gleiche Anforderungen an Kinematik und Werkzeuge stellen, kann die Demontage nicht als logische Umkehrung der Montage verstanden werden [37], [38 nach 39]. Besondere Herausforderungen stellen vor allem aufwendige Demontageprozesse durch nicht demontagegerechte Konstruktionen, heterogene Produktzustände [39] und vielfältige Produkt- und Variantenspektren dar. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist die Umsetzung eines adaptiven Demontagesystems notwendig. Hierfür sind Produkt-, Prozess-, und Systemtechnologien kontinuierlich weiterzuentwickeln.

Nachfolgend werden zunächst die Merkmale Demontagetiefe, Zerstörungsgrad und Adaptivität wirtschaftlicher Demontagesysteme vorgestellt (siehe Abbildung 2). Anschließend werden Produkt-, Prozess und Systemtechnologien als befähigende Technologien für wirtschaftliche Demontagesysteme aufgezeigt.

Abbildung 2: Merkmale eines wirtschaftlichen Demontagesystems

3.1 Zielbild eines wirtschaftlichen Demontagesystems

Die **Demontagetiefe** ist ein wichtiger Indikator für Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit eines Demontageprozesses. Rechtliche Rahmenbedingungen legen in der Regel die minimale Demontagetiefe fest. Diese umfasst alle Demontageoperationen, die für eine vollständige Schadstoffentsorgung gesetzlich vorgeschrieben sind. Die vollständige Zerlegung eines Altprodukts hingegen wird als maximale Demontagetiefe bezeichnet. Zwischen diesen beiden Extrema liegt die optimale Demontagetiefe. Sie wird aus dem Arbeits- und Kostenaufwand für die Demontage sowie aus dem Restwert der Komponenten

ermittelt und erfordert detailliertes Wissen über den Produktzustand, den Produktaufbau, die Verbindungstechniken und die Verfahren zur Lösung der Verbindungen. [40] Damit ein Demontagesystem möglichst wirtschaftlich und nachhaltig betrieben werden kann, gilt es, die optimale Demontagetiefe zu maximieren. Erreicht werden kann eine hohe Demontagetiefe vor allem durch ein entsprechendes Produktdesign, welches die Demontage erleichtert und den damit verbundenen Kostenaufwand reduziert.

Neben der Demontagetiefe ist der **Zerstörungsgrad** maßgeblich für die wirtschaftliche Effizienz des Demontageprozesses verantwortlich. Im Rahmen der Demontage wird zwischen zerstörungsfreier, teilzerstörender und zerstörender Demontage unterschieden [37]. Zerstörende Demontageprozesse werden vor allem für Komponenten angewendet, die recycelt werden. Sind Komponenten aufgrund von irreversiblen Verbindungen oder durch Bauteilveränderungen, wie Oxidation oder Schäden an Schraubenköpfen, nicht mehr zerstörungsfrei demontierbar, ist die zerstörende Demontage der bevorzugte Weg [41]. Zerstörungsfreie Demontageschritte hingegen sind beispielsweise das Lösen von Schraubverbindungen oder Clipbefestigungen und eignen sich vor allem für Komponenten, die aufbereitet und wiederverwendet werden. Zwischen der zerstörenden und der zerstörungsfreien Demontage existiert die teilzerstörende Demontage**.** Diese zeichnet sich dadurch aus, dass Bauteile keine Beeinträchtigungen erfahren, während das Verbindungselement zerstört wird [42]. Häufig bildet sie den Ausgangspunkt für zerstörungsfreie Demontageschritte. Eine wirtschaftliche Demontage erfordert, dass der Grad der Zerstörung beim Zerlegen des Produkts minimiert wird. Zum einen ermöglicht die zerstörungsfreie Demontage die Maximierung der Wiederverwendbarkeit der Komponenten. Zum anderen reduziert sie dadurch den Ressourceneinsatz im Rahmen der Wiederaufbereitung. Wie auch zur Erreichung einer optimalen Demontagetiefe, ist ein entsprechendes Produktdesign für einen minimalen Zerstörungsgrad essenziell.

Neben Demontagetiefe und Zerstörungsgrad beeinflusst vor allem die **Adaptivität** des Demontagesystems die Wirtschaftlichkeit des Remanufacturing. „Adaptivität“ wird in der Literatur definiert als die Fähigkeit, frühzeitige und vorausschauende Anpassungen der Strukturen und Prozesse wirtschaftlich zu bewerkstelligen [43]. Während einem flexiblen Demontagesystem die Fähigkeit zugeschrieben wird, auf sich ändernde Umstände kurzfristig reagieren zu können, zeichnet sich ein adaptives System dadurch aus, dass neben den kurzfristigen gleichberechtigt langfristigen Anpassungen vorgenommen werden können. Langfristige Anpassungen greifen in der Regel tiefer in die zugrunde liegende Struktur ein, sind mit größerem Aufwand an Zeit, Geld und Ressourcen verbunden und erlauben es, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit von Produktionssystemen auch über Jahre hinweg zu gewährleisten. Kurzfristige Anpassungen hingegen sind schnell, effizient und mit minimalen Investitionen vorzunehmen. Flexibilität beschreibt somit vielmehr die kurzfristige Anpassungsfähigkeit im Flexibilitätskorridor, während Adaptivität definiert ist als kurzfristige Flexibilität und langfristige Wandlungsfähigkeit.

In einem Demontagesystem existieren verschiedene Arten der Adaptivität, darunter Prozessadaptivität und Systemadaptivität. Unter Prozessadaptivität versteht man die Fähigkeit, auf Änderungen der Gegebenheiten durch die Anpassbarkeit von Prozessen und Verfahren aktiv und schnell zu reagieren [44]. Ein prozessadaptives System ist zum einen in der Lage, verschiedene Produktarten und Varianten unter Berücksichtigung produktspezifischer Demontageanforderungen zu demontieren. Zum anderen sind adaptive Prozesse essenziell bei der Demontage von Produkten mit unbekannten Produktzuständen. Unbekannte Produktzustände durch Verschmutzung, Zerstörung, Alterung, Verschleiß und Korrosion von Bauteilen beeinflussen die Prozessrandbedingungen und erfordern adaptive, individuelle Bearbeitungsstrategien.

Des Weiteren zeichnet sich ein adaptives Demontagesystem durch ein hohes Maß an Systemadaptivität aus. Systemadaptivität beschreibt die Anpassungsfähigkeit des Systems an äußere Bedingungen [45], wie Nachfrage am Markt oder Ressourcenverfügbarkeiten. Zu den wichtigsten Eigenschaften von adaptiven Systemen zählt die Rekonfigurierbarkeit. Diese erlaubt es, Kapazitäten, Funktionsinhalte und Technologien derart einzustellen [46], dass Systemeigenschaften wie Produktionsrate, Produktmix oder Ressourcen den äußeren Bedingungen angepasst werden können. Zusammenfassend zeichnet sich ein wirtschaftliches Demontagesystem durch folgende Eigenschaften aus:

- Maximierung der Demontagetiefe unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit
- Minimierung des Zerstörungsgrads zur Maximierung der Wiederverwendbarkeit
- Maximale Prozessadaptivität zur Demontage eines breiten Produkt- und Variantenspektrums und zur Einführung produktindividueller Bearbeitungsstrategien
- Maximale Systemadaptivität zur Steigerung der Reaktionsfähigkeit auf äußere Einflüsse

Weiterentwicklungen in Produkt-, Prozess und Systemtechnologien tragen maßgeblich zur Erreichung des Zielbildes bei (siehe Abbildung 3).

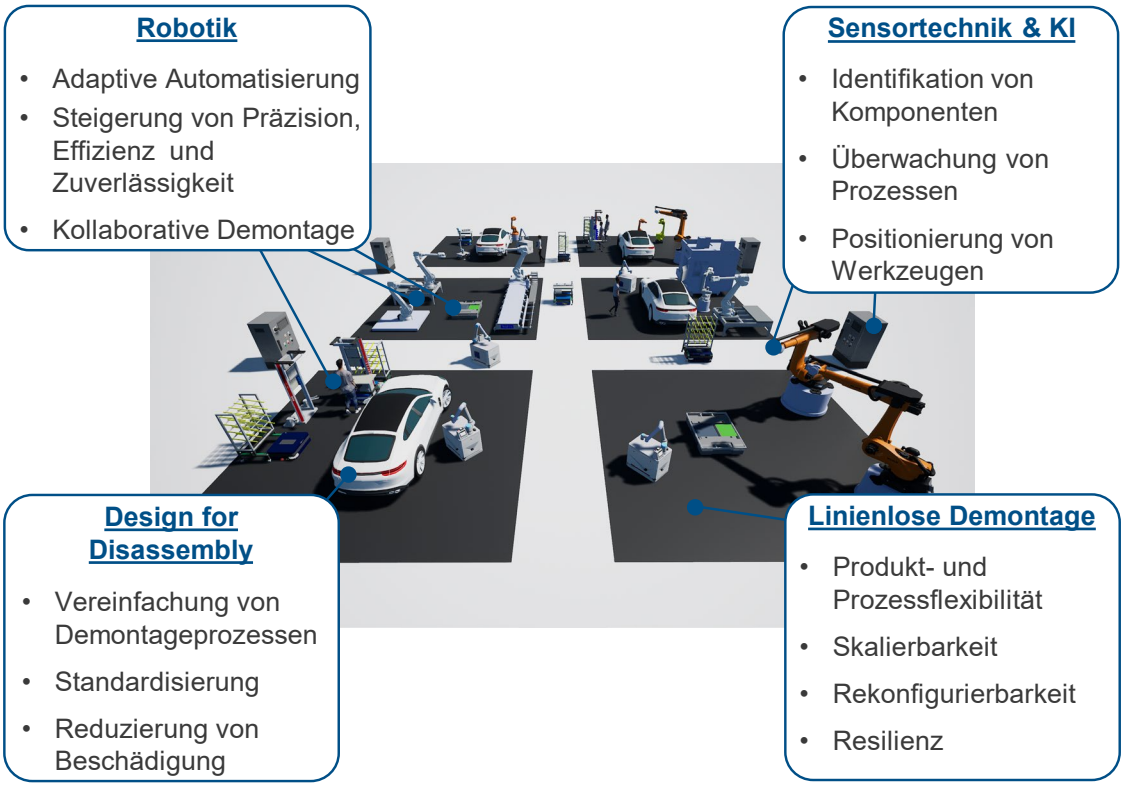


Abbildung 3: Zielbild für wirtschaftliche Demontagesysteme anhand beispielhafter Befähigertechnologien

3.2 „Design for Disassembly“ - Produkttechnologie als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme

„Design for Disassembly“ (DfD) ist ein Produktdesignansatz, der darauf abzielt, die Zerlegung von Produkten in ihre einzelnen Komponenten zu erleichtern, um die Wiederverwendung, das Recycling oder die Aufbereitung dieser Komponenten zu ermöglichen [47]. Das Konzept von DfD besteht darin, Produkte so zu gestalten, dass sie leicht und mit

minimalem Aufwand zerlegbar sind und die Beschädigung der Komponenten während der Demontage minimiert wird. Das primäre Ziel von DfD kann durch eine Vielzahl von Designtechniken erreicht werden. Zu diesen zählen:

- modulares Design
- die Auswahl und Verwendung von Materialien
- die Verwendung von mechanischen Befestigungstechnologien
- eindeutige Kennzeichnung von Komponenten und Materialien. [48]

Modulares Design als Kernelement des DfD-Ansatzes zielt darauf ab, durch modulare Produktarchitekturen Komplexität zu reduzieren und Synergien zu schaffen [49]. Vor allem die Modulbauweise variantenreicher Produkte erweist sich entlang aller Lebensphasen als vielversprechende Maßnahme. Im Rahmen des Remanufacturing bieten modulare Produktarchitekturen vor allem den Vorteil standardisierter Demontageprozesse und begünstigen somit die Prozessautomatisierung.

Neben modularem Design sind die Auswahl und Verwendung von geeigneten Materialien relevant. Design for Disassembly erfordert eine umfassende Untersuchung der eingesetzten Materialien, um diejenigen auszuwählen, die niedrige Umweltauswirkungen haben, die für Montage- und Demontageprozesse geeignet sind und zusätzlich ein hohes Recyclingpotenzial besitzen [48].

Die Verwendung von mechanischen Befestigungstechnologien wie Steckverbindungen, Schraubverbindungen und Verriegelungsmechanismen ist ein zentraler Bestandteil von DfD. Im Gegensatz zu stoffschlüssigen Verbindungen bieten diese den Vorteil der zerstörungsfreien Demontage, sodass die Anzahl wiederverwendbarer Komponenten erhöht und Kosten für Demontageprozesse gesenkt werden können.

Durch die eindeutige Kennzeichnung von Materialien und Komponenten wird das Ziel verfolgt, die Identifizierung und Trennung von Materialien während des Demontageprozesses zu erleichtern. So können Materialien für das Recycling oder die Wiederaufbereitung sortiert, die Rückverfolgbarkeit der Materialien gewährleistet und die Planung der weiteren Verwendung erleichtert werden [48].

Insgesamt kann DfD eine wesentliche Befähigertechnologie zu wirtschaftlichem Remanufacturing sein, die dazu beiträgt, dass Produkte effizient zerlegt, Komponenten wiederverwendet und Materialien recycelt werden.

3.3 Robotische Automatisierung, KI-Entwicklung & Sensortechnik - Prozesstechnologien als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme

Die Automatisierung von Demontageprozessen gilt als zentrale Befähigertechnologie für die Umsetzung wirtschaftlicher Demontagesysteme. Sie ermöglicht es, die Effizienz und Genauigkeit der Prozesse zu erhöhen, die Anzahl der Fehler zu reduzieren und trägt maßgeblich zur Senkung der Kosten bei. Der optimale Automatisierungsgrad des Demontagesystems ist anhand der auf Abbildung 4 dargestellten Faktoren zu wählen.

Manuelle, roboterassistierte und vollautomatisierte Demontage lassen sich anhand ihrer Eigenschaften gegenüberstellen und durch Entwicklungen in den Bereichen KI und Sensortechnik hinsichtlich der Prozessadaptivität von Demontagesystemen steigern.

Die **manuelle Demontage** zeichnet sich durch den höchstmöglichen Adaptivitätsgrad aus, da sie die Möglichkeit bietet, auf unvorhergesehene Gegebenheiten im Demontageprozess reagieren zu können [50]. Manuelle Demontagesysteme sind stufenweise ausbaufähig und im Vergleich zu höheren Automatisierungsgraden mit geringeren Fixkosten für Betriebsmittel verbunden. Geringere Produktivität, hohe Personalkosten und nicht sicher reproduzierbare Qualität hingegen sind Defizite von manueller gegenüber automatisierter Demontage. Insbesondere bei einer hohen Produkt- und Variantenvielfalt stellt die Identifikation von Komponenten eine zusätzliche Herausforderung dar. Abhilfe schaffen an dieser Stelle bildbasierte **KI-Systeme** zur Werkerassistenz [51]. Sie unterstützen beispielsweise bei der Identifikation von Bauteilen, bei denen Typenschilder und Seriennummern nicht mehr lesbar sind oder bei der Zustandsbewertung. Eine Zusammenarbeit zwischen Demontagepersonal und KI-System ermöglicht somit, die Vorteile beider zu kombinieren, Hindernisse und Schwierigkeiten in der Sortierung zu überwinden und die Fehlerquote bei der Identifikation von Produkten zu reduzieren.

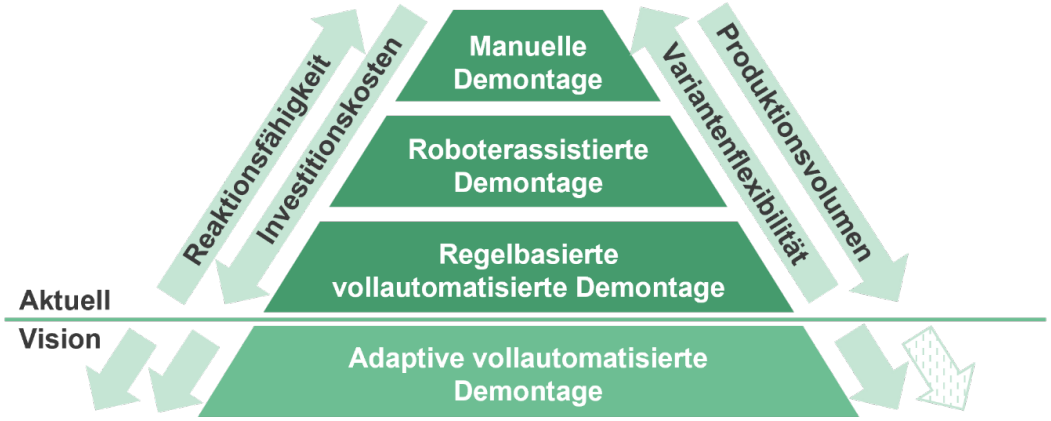


Abbildung 4: Faktoren zur Bestimmung des Automatisierungsgrads von Demontagesystemen, in Anlehnung an [50]

Zur Steigerung der Effizienz und somit des Demontagevolumens stellt die **roboterassistierte Demontage** eine mögliche Erweiterung der manuellen Demontage dar [11]. Im Rahmen der roboterassistierten Demontage arbeiten Mensch und Maschine gemeinsam am zu zerlegenden Objekt [52]. Während der Mensch komplexere Aufgaben ausführt, unterstützt der Roboter bei der Durchführung von wiederkehrenden und zeitintensiven Arbeitsschritten. Zu den Aufgaben des Menschen zählen das Trennen von komplexen Bauteilverbindungen, die Handhabung biegeschlaffer Bauteile oder die Durchführung manueller Prüfaufgaben. Der Roboter hingegen löst parallel Schrauben und Bolzen, deren Position im Vorfeld manuell eingelernt oder über eine Kamera erkannt wurde, und übernimmt Handhabungsaufgaben. Vorteile der roboterassistierten Demontage bestehen neben gesteigerter Produktivität darin, dass der Mensch entlastet und weniger Risiken ausgesetzt wird, indem der Roboter unter anderem das Heben schwerer Lasten oder das Entfernen von Gefahrstoffen übernimmt. [52]

Für Demontageaufgaben von gleichen und modularisierten Produkten in hohen Losgrößen sind häufig **vollautomatisierte Demontagesysteme** zu bevorzugen. Während in der Montage vollautomatisierte Prozesse bereits etabliert sind, sind sie in der Demontage noch kaum zu finden. Pilotprojekte zeigen jedoch, dass die Automatisierung der Demontage mittels SCARA- und 6-Achs-Robotern großes Potenzial birgt [53], [54]. Die für automatisierte Demontageprozesse verwendeten Werkzeuge lassen sich prinzipiell in Handhabungs- und Trennwerkzeuge einteilen [55]. Zu den Handhabungswerkzeugen zählen

beispielsweise Saug- oder Fingergreifer. Trennwerkzeuge können sowohl zerstörungsfreie Werkzeuge wie Schraubendreher oder zerstörende Werkzeuge, wie Bohrspindeln und Plasmaschneider, sein. Adaptivität auf Prozessebene wird in vollautomatisierten Demontagesystemen durch Multifunktionswerkzeuge und Werkzeugwechselsysteme sowie produktindividuelle Programmierung und den Einsatz von KI-Algorithmen erreicht.

Die Fähigkeit, kurzfristige Prozessanpassungen vorzunehmen, ist für die Automatisierung von Demontageprozessen von besonderer Relevanz. **Sensorische Fähigkeiten** von roboterassistierten und automatisierten Demontagezellen sind maßgeblich am Fortschritt dieser Entwicklung beteiligt. Fertigungstoleranzen, die Änderung geometrischer Abmessungen durch Verschleiß, die Verformung durch Prozesskräfte sowie steigende Produkt- und Variantenvielfalt stellen sowohl für die industrielle Produktion als auch für die Automatisierung der Demontage eine enorme Herausforderung dar. Zur Bewältigung der ihnen zugewiesenen Aufgaben müssen Demontageroboter somit ein gewisses Maß an Entscheidungsfreiheit aufweisen. Nach NEHMZOW impliziert Entscheidungsfreiheit „*die Fähigkeit der Maschine, ihren Handlungsablauf durch eigene Inferenzprozesse zu bestimmen, statt einer festgelegten, rigiden Anweisungssequenz von außen zu folgen*" [56]. Ein Roboter muss demnach seine Umgebung wahrnehmen und interpretieren, einen Handlungsplan zur Bewältigung der Aufgabe definieren und schließlich eine entsprechende Aktion ausführen [56]. Die Wahrnehmung der Umgebung und der inneren Zustände von Robotern erfolgt durch den Einsatz von Sensoren. Sie erlauben es dem Roboter, seinen eigenen Zustand, wie die Position eines Roboterarms oder von Endeffektoren, zu bestimmen, Berührungen wahrzunehmen, Entfernungen zu Objekten zu messen oder Bilder der Umgebung aufzuzeichnen [57]. Die Fusion von Sensordaten aus verschiedenen Quellen und deren Interpretation erlauben somit eine Kompensation von Positionier- und Bauteilabweichungen und ermöglichen im Allgemeinen eine adaptive Prozessanpassung.

Insgesamt trägt die technologische Entwicklung in den Bereichen Automatisierung, Sensortechnik und KI maßgeblich dazu bei, kostenintensive manuelle Demontageprozesse durch automatisierte adaptive Prozesse zu ersetzen und somit Remanufacturing wirtschaftlich zu realisieren.

3.4 Linienlose Montage - Systemtechnologie als Befähiger für wirtschaftliche Demontagesysteme

Für die erfolgreiche Implementierung eines wirtschaftlichen Demontagesystems ist die Wahl einer geeigneten Organisationsform essenziell. Mit ihr werden die grundlegenden Eigenschaften des Systems, wie Flexibilität und Adaptivität, aber auch die räumlichen und zeitlichen Zusammenhänge festgelegt [58]. Schwankungen im Produktionsvolumen, die Integration neuer Produkte und Prozesse sowie hohe Variantenflexibilität stellen besondere Herausforderungen an Demontagesysteme.

Die **getaktete Fließmontage** basiert auf einer räumlich und zeitlich starren Verkettung von Montagestationen. Aufgrund der räumlichen Verkettung können Stationen im Prozess weder übersprungen noch nachträglich hinzugefügt werden, während durch die zeitliche Verkettung Aufträge nur dann weitergegeben werden können, wenn die nachfolgende Station ihren Auftrag ebenfalls weitergegeben hat. Durch die räumlich und zeitlich starre Verkettung ergibt sich somit eine gemeinsame Taktzeit für alle Stationen. [36] Durch Produktvarianten mit dann variierenden Arbeitsinhalten und Prozesszeiten sinkt die Effizienz der getakteten Fließmontage. Demnach eignet sich die getaktete Fließmontage vor allem für Demontageprozesse von Standardprodukten ohne große Varianten-

vielfalt in hohen Stückzahlen. Andere Organisationsformen, wie beispielsweise die **Einzelplatzdemontage**, **Baustellendemontage** oder **Werkstattdemontage** ermöglichen zwar eine höhere Prozess- und Systemadaptivität, sind aber zum wirtschaftlichen Betrieb von Großserien nicht geeignet.

Die Organisationsform der sogenannten **linienlose Montage** schafft an dieser Stelle Abhilfe und leitet einen Paradigmenwechsel in der Gestaltung von Montagesystemen ein. Ein linienloses Montagesystem unterscheidet sich dadurch von der klassischen Fließmontage, dass die Komponenten nicht auf festgelegten Wegen, wie einem Förderband, durch die Montagestationen geleitet werden. Stattdessen kann jedes Produkt individuell durch das Montagesystem geführt werden und muss nicht mehr einem festen Takt folgen. Die linienlose Montage zeichnet sich demnach vor allem durch produktindividuelle, flexible Montageabfolgen und die Koordination des Materialflusses durch ein ereignisbasiertes Leitsystem aus, welches Auftragsrouten anhand des System- und Produktstatus autonom bestimmt [36]. Skalierbarkeit, Stationsrekonfigurationen im laufenden Betrieb und die Abbildung variantenreicher Prozesse erhöhen die Ressourcennutzung des Produktionssystems und schaffen über organisatorisch induzierte Redundanz die Grundlagen, welche die linienlose Organisationsform nicht nur für Montagesysteme, sondern auch für Demontagesysteme begünstigt. Durch die Möglichkeit, das System, um zusätzliche Stationen zu ergänzen, sowie durch hohe Flexibilität gegen Produkt- und Prozessvariationen oder Störungen, eignet sich die linienlose Organisationsform außerdem für kombinierte Montage- und Demontagesysteme. Ein kombiniertes Montage- und Demontagesystem ist ein Fertigungssystem, das in der Lage ist, sowohl Produkte aus Einzelteilen zusammenzubauen als auch Produkte in Einzelteile zu zerlegen. Diese Systeme sind so konzipiert, dass sie eine flexible und effiziente Produktion ermöglichen, indem die Rückgewinnung von Materialien und die Wiederaufbereitung von Produkten in den Produktionsprozess integriert wird. Dies schafft Lieferantenunabhängigkeit und ermöglicht eine partielle Entkopplung von globalen Einflüssen.

Eine linienlose Organisationsform birgt somit großes Potenzial, um erfolgreich in Demontage- als auch in kombinierten Montage- und Demontagesystemen eingesetzt zu werden. Vor allem durch die geschaffenen Synergien und den hohen Adaptivitätslevel grenzt sie sich von anderen Organisationsformen ab und schafft die Möglichkeit, Remanufacturing Systeme wirtschaftlich zu betreiben.

4 Use Cases

Im Folgenden werden drei Beispiele aus Unternehmen der Expertengruppe vorgestellt, die konkrete Anwendungen zur Schließung von Stoffkreisläufen aufzeigen. Das Beispiel der Firma Miele & Cie. KG stellt das Refurbishment von Waschmaschinen vor. Bei der Ford Werke GmbH steht das zukünftige flächendeckende Remanufacturing von Fahrzeugbatterien im Fokus. Im dritten Use Case werden die Möglichkeiten der Schuhaufbereitung durch PCH Innovations vorgestellt. Die im Folgenden beschriebenen Beispiele zeigen die aktuellen Überlegungen zur Kreislaufwirtschaft in drei sehr verschiedenen Branchen, die sich sowohl im Markt als auch in der Produktgestaltung und den zu erwartbaren Rückläuferquoten unterscheiden. In den Use Cases werden konkrete Potenziale von R-Strategien, die Umsetzung der notwendigen Demontage und die resultierenden Herausforderungen für die Unternehmensbereiche diskutiert.

4.1 Refurbishmentprozesse für Second-Life Waschmaschinen

Ausgangssituation

Die Umsetzung von Kreislaufstrategien stellt auch für etablierte Unternehmen eine wichtige Perspektive dar. Mit über 23.000 Mitarbeitenden erwirtschaftete die Miele & Cie. KG im Geschäftsjahr 2022 einen Umsatz von 5,43 Mrd. €. In ihrer aktuellen Unternehmensstrategie wird das Thema Nachhaltigkeit explizit als eine der tragenden Säulen implementiert. Auf diese Weise begegnet Miele den gesellschaftlichen Herausforderungen und der erweiterten Produktverantwortung, aber auch der gestiegenen Nachfrage nach nachhaltigen und langlebigen Produkten. Als weltweit führender Anbieter von Premium-Haushaltsgeräten sowie von Premium-Elektrogeräten für den gewerblichen Einsatz gilt daher dem Bereich Kreislaufwirtschaft und damit einhergehend Second-Life-Produkten ein besonderes Augenmerk, der am Business Case der Waschmaschine umgesetzt wird. Dazu findet seit Herbst 2022 in einem regional begrenzten Vertriebsbereich das sogenannte Refurbishment – also die Wiederaufbereitung – von Waschmaschinen statt.

Tabelle 1: Kurzübersicht Miele & Cie. KG Use Case

Unternehmen:	Miele & Cie. KG
Produkt:	Waschmaschine
R-Strategie:	Refurbishment
Hauptherausforderungen:	Produktvarianz und -komplexität
Wichtigste Befähigertechnologie:	Adaptive Prozessautomatisierung

Ziel des Anwendungsfalls und Aufbau des Produkts

Ziel des Anwendungsfall ist es, das Refurbishment von hochwertigen Geräten und somit von Verwendungswegen im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu etablieren. Je nach Typ, Alter und Zustand der Waschmaschine muss der Aufbereitungsprozess adaptiv auf das vorliegende Produkt angepasst werden. Hierfür sind geeignete Demontagesysteme notwendig. Das Potential zum Refurbishment leitet sich aus der Überlegung ab, dass die angebotene Waschmaschine auch bisher so ausgelegt ist, dass nach einem langen ersten Lebenszyklus beim Kunden das Produkt grundsätzlich weiterhin funktionsfähig ist und daher noch nicht dem Rohstoffrecycling zugeführt werden sollte. Somit stellt das Refurbishment von Haushaltsgroßgeräten nicht nur eine Reaktion auf zukünftige Verordnungen zur Kreislauffähigkeit von Produkten, sondern auch einen interessanten Business Case dar. In dem regional begrenzten Vertriebsbereich befindet sich der Anteil wiederaufbereiteter Geräte derzeit noch im einstelligen Prozentbereich und soll weiter ausgebaut werden.

Für das benötigte Demontagesystem ist es notwendig, den Produktaufbau zu betrachten. Grundsätzlich bleibt die individuelle Waschmaschine als Produkt bestehen und bildet das Gerüst des Refurbishments. Verschiedene Komponenten werden jedoch aufbereitet oder getauscht sowie in jedem Falle gereinigt. Es wird generell nicht eine hohe Demontagetiefe bis auf die einzelnen Komponentenbestandteile benötigt, sondern die Zugänglichkeit für den Austausch ist entscheidend. Gleichzeitig sollen die Komponenten mit einem geringen Zerstörungsgrad austauschbar sein.

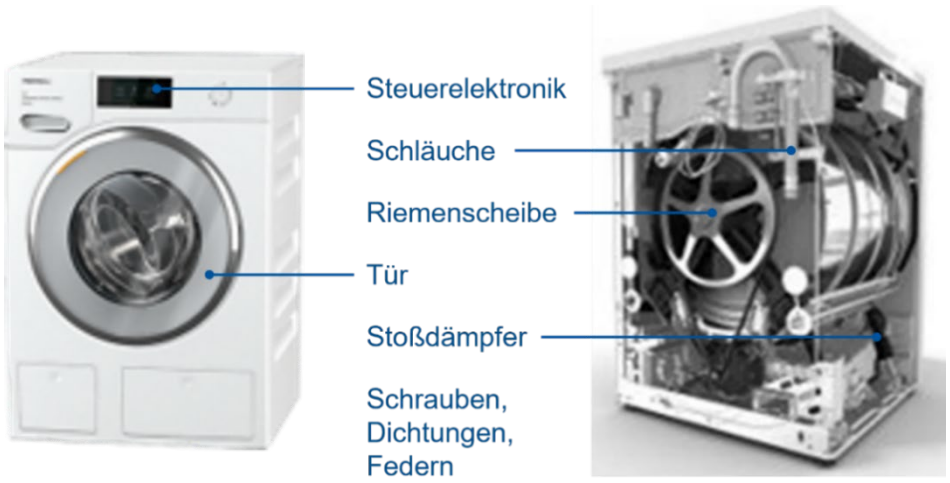


Abbildung 5: Beispielhafte Auswahl von Waschmaschinen-Komponenten, die im Refurbishment-Prozess getauscht werden können (Quelle: Miele)

Abbildung 5 zeigt exemplarisch den Aufbau einer Waschmaschine und mögliche Bauteile, die potenziell im Rahmen der Wiederaufbereitung zu untersuchen sind. Zu diesen gehören beispielsweise die Gebrauchsteile Schläuche, die Riemenscheibe oder die Stoßdämpfer, aber auch die Tür sowie die Steuerelektronik. Dieser Vorgang bietet dann auch die Möglichkeit das Gerät z. B. durch Softwareupdates aufzuwerten. Der Variabilität der Komponenten sowie ihren – in jedem Gerät unterschiedlichen – Zustand muss in einem Refurbishment-System begegnet werden.

Eigenschaften des Demontagesystems

Die Aufbereitung von Miele Waschmaschinen erfolgt nach einer umfassenden Prozesskette, die in den Grundzügen im Folgenden gemäß Abbildung 6 erläutert wird:

Abbildung 6: Vorgesehene Refurbishment Prozesskette für die Second-Life Waschmaschine (Quelle: Miele)

Zustandsbewertung. Es erfolgt eine zentrale Sammlung der Geräte durch den Kundendienst als eigene Logistiklösung. Der Produktzustand wird geprüft und die technische Aufbereitung sowie deren Wirtschaftlichkeit hinsichtlich Aufbereitungsdauer und Teilekosten werden mit Hilfe einer eigenen Softwarelösung bewertet.

Automatisierte Montageplanung. Sofern die technische Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Aufbereitung gegeben sind, wird softwaregestützt die Detailplanung des Aufbereitungsprozesses durchgeführt. Es wird eine gerätespezifische Planung der De- und Remontageprozesse durch die Bestimmung der zu tauschenden Komponenten durchgeführt. Die Demontagetiefe wird dabei in Abhängigkeit vom Zustand der zu tauschenden Komponenten individuell bestimmt. Auch der notwendige Zerstörungsgrad wird je nach Zustand und Produktmodell festgelegt.

De- und Remontage. Nach durchgeführter Planung folgen die Prozesse Demontage, Teiletausch und Remontage. Zunächst werden hierfür die in der Vorprüfung ermittelten Teile, darunter auch „hygienisch belastete“ Teile, demontiert. Im Anschluss werden die zu tauschenden Komponenten unter Berücksichtigung der gerätespezifischen Refurbishment-Planung ersetzt und die Waschmaschine wird in ihrer Gesamtheit remontiert. Diese De- und Remontagetätigkeiten sind je nach Produkttyp und -zustand starken Schwankungen unterlegen. Verschiedene Lösungskomponenten unterstützen beim Erreichen des Zielbildes: Als Teil eines demontagegerechten Produktdesigns reduziert die weitgehende Vermeidung von stoffschlüssigen Verbindungen, wie z. B. durch Klebeprozesse, den Demontageaufwand sowie die -kosten erheblich und verringert den Zerstörungsgrad im Prozess. Weiterhin handelt es sich in der bisherigen Gestaltung um eine Werkstattmontage, in der der Automatisierungsgrad gering und auf punktuelle Prozessschritte beschränkt ist. Der hohe Adaptivitätslevel manueller Prozesse ermöglicht es, auf unvorhergesehene Gegebenheiten individuell zu reagieren. Das Gesamtsystem richtet sich zurzeit vor allem nach dieser hohen Prozessadaptivität. Gleichzeitig ist die Systemadaptivität – also z. B. die Anpassung der Produktionsrate – bisher niedrig priorisiert, weil der vorgestellte Use Case neu in der Umsetzung ist.

Software Update. Nach erfolgreicher Remontage wird die Software der Waschmaschine aktualisiert. Je nach Alter und Ausstattung können die Waschmaschinen dadurch auch eine zusätzliche Wertsteigerung erfahren.

Automatisierte Funktionstests. Im anschließenden Prozessschritt wird eine vollautomatisierte Teststation durchlaufen. Diese stellt sicher, dass die Maschine vollständig funktionsfähig ist, bevor ein Aufbereitungszertifikat ausgestellt wird.

Hygienische Reinigung. Nach Abschluss der Funktionsprüfung erfolgt die hygienische Reinigung. Dabei werden die äußeren und vor allem die inneren hygienisch belasteten Komponenten, wie die Trommel, intensiv gereinigt.

Vorbereitung Versand. Zuletzt wird die aufbereitete, überprüfte und gereinigte Maschine für den Versand vorbereitet und ausgeliefert.

Herausforderungen und nächste Schritte

Mit dem neuen Business Case des Refurbishments von Waschmaschinen stellen sich für Miele gleichzeitig technische und betriebswirtschaftliche Herausforderungen, die sich aus dem Produkt und dem Demontagesystem ergeben:

Vor allem die angesprochene hohe Produktvarianz und Produktkomplexität erfordern eine hohe Adaptivität der Prozesse sowie des Gesamtsystems. Aufgrund der regionalen Begrenzung des Vertriebsbereichs der Second-Life-Waschmaschinen ist die Stückzahl refurbishter Geräte im Vergleich zur Neuproduktion derzeit noch gering. Demnach ist es möglich, De- und Remontageprozesse größtenteils manuell durchzuführen. Diese manuellen Tätigkeiten ermöglichen zwar produktindividuelle Demontageprozesse; sie sind jedoch mit steigenden Stückzahlen zu automatisieren, um die Skalierbarkeit und damit die Wirtschaftlichkeit des Business Cases sicherzustellen. Gerade diese Automatisierbarkeit

muss jedoch aufgrund der gezeigten Teilevielfalt und den individuellen Prüfergebnissen die hohe Prozessadaptivität weiterhin gewährleisten können. Hierfür werden adaptive Demontagesysteme benötigt, die die Möglichkeit bieten, den vorgestellten Business Case zu skalieren und dadurch industriell auszuweiten. Auch kann auf diese Weise die Systemadaptivität des Zielsystems gesteigert werden, weil das System variabel auf unterschiedliche Stückzahlen und schwankende Losgrößen eingehen kann. Potenziale für die Automatisierung des Demontagesystems bietet zunächst das bereits bekannte Montagesystem, da hierbei für die ersten Automatisierungsschritte auf Parallelen zurückgegriffen werden kann. Die vollständige Automatisierung der Demontage stellt dann eine langfristige Aufgabe aufgrund der für die verschiedenen Produktzustände notwendigen Adaptivität dar. Hinzu kommt der Bedarf an entsprechenden Planungs- und Steuerungsprozessen in der Demontage. Zudem stellt die Nutzung von Daten einen zentralen Befähiger adaptiver Prozesse dar: Sensorik ermöglicht die Prozessanpassung der Demontagetätigkeiten basierend auf dem tatsächlichen Zustand der Komponenten.

Zusammenfassend lässt sich daher sagen, dass bei Miele die Geschichte traditionell langlebiger Produkte eine Fortschreibung erfahren hat: Durch eine zertifizierte Aufbereitung kann zusätzlich ein „Second-Life“ für diese Geräte ermöglicht werden, sodass die Lebensdauer über den ersten Lebenszyklus hinweg verlängert wird. Refurbishment mit adaptiver Demontage trägt somit auf neuartige Weise zu Ressourcenkreisläufen bei und kann sogar neue Käuferschichten erschließen. Darüber hinaus kann sich in Zukunft über Leasing-Modelle und „Pay-per-Use-Optionen“ der Kund:innenkreis für aufbereitete Geräte noch weiter erhöhen. Für die Erschließung größerer Märkte stellen insbesondere die Automatisierung des Demontagesystems und der Erhalt der Adaptivität zentrale Aufgaben dar.

4.2 Demontage von PKW-Batteriekästen

Ausgangssituation

Die Ford Motor Company ist ein weltweit agierender Automobilkonzern mit 186.000 Mitarbeitenden (2020) und 136,3 Mrd. USD Umsatz (2021) [59]. In dem globalen Bestreben zur Reduktion von CO2-Emmissionen haben sich die EU-Mitgliedsstaaten im EU-Umweltrat 2023 darauf geeinigt, dass ab 2035 neuzugelassene Fahrzeuge keine CO_2-Emissionen mehr ausstoßen dürfen [60]. Ford of Europe hat in diesem Zuge angekündigt, bereits ab 2030 in Europa ausschließlich elektrische Fahrzeuge herzustellen und anzubieten [61]. In der Ford Werke GmbH in Köln sollen ab 2023 reine Elektrofahrzeuge auf einer VW-Plattform hergestellt werden. Da Hersteller von Batterien durch die EU-Batterierichtlinie verpflichtet sind, ein Rücknahmesystem anzubieten und strenge Sammelquoten zu erfüllen [62], rechnet Ford in der EU in 10-15 Jahren mit mehreren Hunderttausend Rückläufer-Batterien jährlich. Die verbauten Batterien müssen am Ende ihrer Nutzungsphase dem Recycling zugeführt werden, haben aber mit der aktuellen Zelltechnologie auch weiteres Potenzial für Second Life-Anwendungen.

Tabelle 2: Kurzübersicht Ford Motor Company Use Case

Unternehmen:	Ford Motor Company
Produkt:	Antriebsbatterie von Elektrofahrzeugen
R-Strategie:	Remanufacture, Repurpose, Recycling
Hauptherausforderungen:	Rückführungslogistik und rechtliche Rahmenbedingungen
Wichtigste Befähigertechnologie:	Design for Disassembly

Ziel des Anwendungsfalls und Aufbau des Produkts

Das Ziel eines adaptiven Demontagesystems bei Ford ist es, Batterien bis auf Modulebene zerstörungsfrei zu demontieren, um sie so auf verschiedene Arten in die Kreislaufwirtschaft zurückführen zu können. Dafür sind bereits Forschungsprojekte mit Partnern und Hochschulen gestartet, mit deren Ergebnissen Pilotanlagen aufgesetzt werden können. Folgende Wege für die Rückführung in der Kreislaufwirtschaft sind aktuell denkbar:

- Die Batterie wird demontiert und neu zusammengestellt sowie getestet, um als Ersatzbatterie oder für Gebrauchtwagen in den Markt gebracht zu werden (Remanufacturing).
- Die Batterie wird für einen anderen Einsatzzweck, wie z. B. in stationären Speichern bei anderen Unternehmen, genutzt (Repurposing).
- Die wertvollen Metalle der Batterie werden zurückgewonnen und für die Herstellung neuer Batterien genutzt (Recycling).

Neben dem Zustand der Batterien ist die Art der Rückführung abhängig von der verwendeten Zellchemie. Aktuell konkurrieren Lithium-Ionen-Batterien mit Kathodenmaterial basierend auf Nickel, Mangan und Cobalt (NMC) in unterschiedlicher Zusammensetzung mit Batterien, die ohne diese teils teuren und in Bezug auf die Gewinnung und die Sicherheit bei mechanischen und thermischen Einflüssen problematischen Grundstoffe auskommen. Lithium-Eisenphosphat (LFP) Batterien stellen eine solche Alternative innerhalb des oben erwähnten Zeithorizonts dar. Dies führt zu einer hohen Produktvariabilität und damit Komplexität für die Aufbereitungsprozesse.

Der derzeitige, generelle Aufbau der Batterie eines E-Fahrzeuges ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Batterie mit ihren einzelnen Modulen ist im Fahrzeug in einem Batteriekasten eingebettet. Dort befinden sich außerdem Steuerungssystem, Kühlanlage und Verkabelung. Durch den modularen Aufbau der Batterie ist generell eine hohe Demontagetiefe möglich. Neben den wertvollen Batteriemodulen können die anderen Komponenten unterschiedliche Wege nehmen: Die Metallplatten und Batteriekästen sind voraussichtlich einzuschmelzen, da sich zum einen das Design für neue Fahrzeuge innerhalb der Lebenszeit des Fahrzeugs geändert hat und zum anderen die Alterung durch äußere Einflüsse signifikant ist. Die Zähflüssigkeit gealterter Kühlflüssigkeit führt bei der Demontage der Platten zur Verformung, was eine Wiederverwendung zum heutigen Stand ausschließt. Die Verkabelung wiederum kann z.B. über das bereits heute schon existierende Recycling der Kreislaufwirtschaft zurückgeführt werden. Eine Erhöhung der Zähigkeit gealterter Wärmeleitpasten führt in einigen Batteriedesigns, bei der Demontage der Platten,

zu Verformungen, was eine Wiederverwendung ausschließt. Neuere Designs haben dieses Problem bereits gelöst.

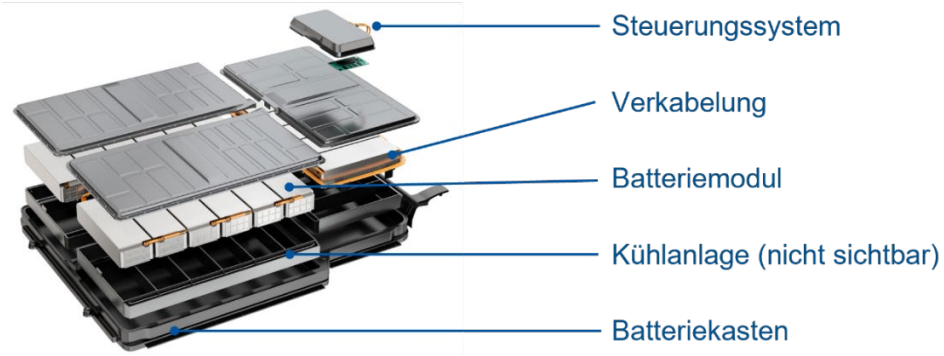


Abbildung 7: Schematischer Aufbau eines Batteriekastens © iStock

Eigenschaften des Demontagesystems

In der technischen Ausgestaltung des Demontagesystems in Hinblick auf die in Kapitel 3 vorgestellten Lösungsbausteine ergeben sich je nach Anforderung Möglichkeiten, die an dieser Stelle diskutiert werden.

Die Stahlkonstruktion des Batteriekastens schützt die wertvollen Batteriemodule vor äußeren Einflüssen. Bisherige Tests deuten darauf hin, dass Korrosion vermutlich keine großen Auswirkungen auf das System hat und innen liegende Komponenten bei der Rückführung gut erhalten sind. Dies bedeutet geringere Anforderungen an die Prozessadaptivität, da nicht so stark auf mechanische Veränderungen reagiert werden muss. Mechanische Prüfungen sind automatisiert möglich, wie es auch bereits bei z. B. Nähten und Verschraubungen in der Fertigung der Fall ist. Der Automatisierungsgrad der Demontage kann also in einem ähnlichen Bereich wie bei der Montage liegen. Allerdings sind weitere sensorische Fähigkeiten für die Erkennung von Varianten erforderlich. Wenn in dem Demontagesystem ausschließlich herstellereigene Systeme vorliegen, können die Fahrzeug-IDs mit der eigenen Datenbasis abgeglichen werden und vorbestimmte Demontage-Anweisungen geladen werden. Neben einer vollautomatisierten Demontage ist die in Kapitel 3 beschriebene roboterassistierte Demontage denkbar. Gerade die Handhabung von schweren Komponenten, die Übernahme von wiederholenden Tätigkeiten wie das Entfernen von Schrauben oder der Umgang mit Giftstoffen kann in einer Mensch-Maschine-Kollaboration von Robotern übernommen werden.

Logistische Fragestellungen beeinflussen die Organisationsform. Fahrzeuge müssen dezentral entgegengenommen werden. Bevor der Batteriekasten zentral komplett demontiert werden kann, muss er aus dem Fahrzeug herausgenommen werden. Dies kann dezentral in den Annahmestellen oder zentral bei den Demontagesystemen geschehen. Da der Transport von Batteriekästen ohne Fahrzeug zwar kompakter ist, aber hohe Sicherheitsanforderungen hat, ist die Festlegung aktuell noch in Diskussion. Die anschließende Demontage kann anders als die Montage in festen Fertigungslinien in Modulen aufgebaut sein, um auf schwankende Stückzahlen reagieren zu können.

Eine hohe Bedeutung für die Ausgestaltung des Demontagesystems kommt außerdem Design for Disassembly-Ansätzen zu. Die Batterie ist eine statische Komponente innerhalb des Fahrzeugdesigns und kann so aufgebaut werden, dass sie leicht zu demontieren ist. Allerdings gibt es aus Platz- und Designgründen den Trend, die Batterie in die existierende Fahrzeugstruktur zu integrieren. Dies führt zu höherer Komplexität und Produktvarianz. Aktuell gibt es noch Designs bei denen die Deckel der Batteriekästen verklebt

werden, was die Demontage erschwert. Die Integrationsmöglichkeiten in die Fahrzeugstruktur und der Einsatz von Verschraubungen in Zusammenhang mit nicht geklebten Dichtungen statt klebenden Flüssigdichtungen müssen als Kostenberechnung über beide Prozessschritte Montage und Demontage evaluiert werden. Eine zerstörungsfreie Entnahme der Batteriemodule ist dabei die notwendige Randbedingung.

Herausforderungen und nächste Schritte

Da in den nächsten Jahren zunächst geringe Stückzahlen zu erwarten sind (z. B. in Form von Batterien mit Produktionsfehlern), ist die industrielle Ausgestaltung des Demontagesystems zunächst offen. Wegen der rechtlichen Notwendigkeit zur Annahme von Batterien ist die Logistik (dezentral oder zentral) von Priorität. Eine Strategie könnte sein, eine manuelle Demontage zu einem gewissen Grad vorzusehen, um eine dezentrale Reparatur in lokalen Werkstätten zu ermöglichen. Darauf aufbauend kann die Logistikstruktur für eine zentrale Demontage aufgebaut werden. Daneben sind Gewährleistung, Haftung und Wertbestimmung der Batterien bei der Bereitstellung reparierter Batteriemodule für Second Life-Anwendungen bei anderen Unternehmen sowie der Einbau überholter Batteriesysteme in Gebrauchtfahrzeugen noch nicht geklärte Fragestellungen, welche die Kreislaufwirtschaft beeinflussen können. Für Letzteres ist ein einheitliches (herstellerübergreifendes) zertifiziertes Verfahren anzustreben, was auch die Kundenakzeptanz von aufbereiteten Batterien erhöhen könnte.

Entwicklungen in der Zellchemie haben erhebliche Einflüsse auf die Möglichkeiten der Weiterverwendung von Batterien. Zusammen mit Veränderungen im Fahrzeugdesign bedeutet dies, dass sich das Demontagesystem kontinuierlich weiterentwickeln muss. Im Demontageprozess wird Arbeitssicherheit wegen der eingesetzten Materialien eine Rolle spielen, was den Bedarf an Automatisierung weiter erhöht. Wenn die Stückzahlen steigen, ist eine weitgehende Automatisierung in Demontagelinien oder freien Modulen notwendig. In der Automobilindustrie haben Montagesysteme bereits einen hohen Reifegrad, weswegen auf bekannte Technologien und Partner zurückgegriffen werden kann. Aber das starke prognostizierte Wachstum wird den erweiterten Einsatz von Daten und Sensorik erfordern, um eine hohe Adaptivität zu ermöglichen. Daten über das Design und aus der Nutzungsphase liefern wichtige Informationen über Demontageprozesse und den Zustand der Batterie. Sensorik kann, wie aktuell in der Montage, zur Positionierung der Produkte und Maschinen zueinander genutzt werden und vor allem zur genauen Bestimmung des Zustandes und des Restwerts der Batterie.

4.3 Remanufacturing von Freizeitschuhen

Ausgangssituation

PCH Innovations, gegründet 2006 in Los Angeles, ist ein Berliner Forschungs- und Entwicklungs-Labor, spezialisiert auf zirkuläre Robotik, generative KI und Computer Vision Lösungen. PCH entwickelt maßgeschneiderte Systeminnovationen bis hin zu skalierbaren industriellen Anwendungen. Seit einigen Jahren konzentriert sich das Unternehmen auf die Entwicklung von Systemen zum Handling von verformbaren Materialen und Produkten wie z. B. Textilien, Schuhe, Rucksäcken und Zelten. Hintergrund ist die Ausweitung bestehender Ökodesign-Richtlinien der EU für nachhaltige Produkte auf Produktkategorien wie Kleidung und Schuhe. Kernziel der Initiative zur Senkung des ökologischen Fußabdrucks von Produkten ist es, den Materialeinsatz zu minimieren und die Ressourceneffizienz zu maximieren, inkl. entsprechender Wiederaufbereitungs- und Recycling-

Maßnahmen. Bei Turnschuhen existieren beispielsweise bereits erste Ansätze die Schuhe zu einem hohen Anteil zu recyclen oder einzelne Komponenten in den Materialkreislauf zurückzuführen. PCH Innovations erforscht für die Textilbranche in diesem Kontext den Einsatz von Automatisierungslösungen und entwickelt Demontagesysteme für Schuhe, Zelte, Rucksäcke etc.

Tabelle 3: Kurzübersicht PCH Innovations Use Case

Unternehmen:	PCH Innovations
Produkt:	Freizeitschuhe
R-Strategie:	Remanufacture, Repair, Recycling
Hauptherausforderungen:	Produktvarianz und Handhabung
Wichtigste Befähigertechnologie:	Sensorik + Machine Learning

Ziel des Anwendungsfalls und Aufbau des Produkts

Dieser Beitrag fokussiert die technischen Anforderungen und Umsetzungsmöglichkeiten für die Demontage von Schuhen. Als Ziel eines solchen Demontagesystems wird die Zerlegung von Schuhen in die jeweiligen Einzelkomponenten und die Rückführung der Materialien in die entsprechenden, separaten Materialströme definiert. Die Demontage stellt somit einen unabdingbaren Befähiger für eine zielgerichtete Rückführung von Produkten und ihren Bestandteilen dar, die anderenfalls als Gesamtprodukt nur thermisch oder chemisch verwertet werden könnten.

Allerdings ist die Zerlegung und Materialseparation von Schuhen eine komplexe Herausforderung im industriellen Kontext: Demontagesysteme sind bei Turn- und Freizeitschuhen mit einer hohen Varianz in Bezug auf die Produktbestandteile und den individuellen Zustand konfrontiert. Schuhe bestehen aus einer Kombination von bis zu 500 Materialien, darunter Naturfasern, Kunstfasern, Metalle und Kunststoffen, wie TPU oder PLA. Um die gewünschten Produkteigenschaften zu erreichen, setzen Hersteller vor allem auf firmeneigene Materialmischungen, welche keine Transparenz über die Materialeigenschaften und -zusammensetzungen für die Wiederaufbereitung zulassen. Auch die Verbindungsmöglichkeiten dieser Materialien sind vielzählig: Kleben, Nähen, Kitten oder Spritzgießen sind gängige Verfahren, die kombiniert bei Schuhen eingesetzt werden. Nicht zuletzt ist bereits der Produktaufbau eines Schuhs komplex und über die Modelle hinweg wenig einheitlich, wie in Abbildung 8 schematisch dargestellt. Dies ist darin begründet, dass produktseitig weder Standards in der Entwicklung noch in der Produktion existieren. Zudem werden keine Stücklisten zur Verfügung gestellt, die Transparenz über die verwendeten Materialien ermöglichen.

Neben der hohen Varianz in den Schuhmodellen muss zusätzlich die schwankende Abnutzung des Schuhs und somit der Produktzustand bei der Demontage berücksichtigt werden. Der Zustand bestimmt, ob und auf welche Weise Komponenten und Materialien in den Kreislauf zurückgeführt werden können. Weiterhin muss das Demontagesystem der Anforderung gerecht werden, dass bestimmte zentrale Materialeigenschaften erhalten bleiben müssen; um beispielsweise Baumwolle recyclen zu können, ist der Erhalt einer gewissen Restfaserlänge notwendig. Diese Randbedingungen beeinflussen den durch das System maximal erlaubten Zerstörungsgrad. Auch wenn die maximale Demontagetiefe auf der Ebene der einzelnen und reinen Materialien angestrebt wird, ist zunächst auch eine komponentenweise Demontage denkbar. Ein realistischer Business Case be-

steht in der Demontage und der Reparatur der Sohlen von Wanderschuhen. Wanderschuhe sind hochwertige Produkte mit einem definierten Einsatzzweck. Folglich sind die Modelle und ihre Abnutzungsbereiche einheitlicher und die Varianz, der das Demontagesystem begegnen muss, geringer.

Zusammenfassend stellt sich die zentrale Forderung, dass ein Demontagesystem für Schuhe eine hohe Systemadaptivität aufweisen muss, um auf eine große Anzahl an Produkten und deren Abnutzung reagieren zu können. Der jeweilige zu wählende Zerstörungsgrad und die Demontagetiefe sind insbesondere vom tatsächlichen Zustand des individuellen Schuhs sowie der gewünschten Rückführungsart abhängig.

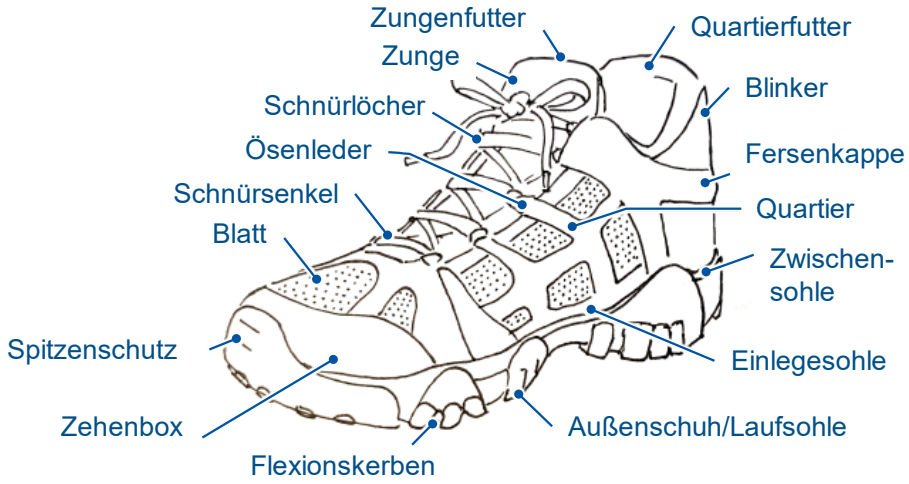


Abbildung 8: Beispiel eines Schuhs und seiner Komponenten

Eigenschaften des Demontagesystems

Obwohl noch viele Randbedingungen der Demontage unbekannt sind, kann ein Prozess mit den vier zentralen Aufgaben der Erkennung, Sortierung, Handhabung und Demontage beschrieben werden, die in dieser oder einer vergleichbaren Reihenfolge zu durchlaufen sind:

Erkennung. Die erste Aufgabe besteht darin, die zu demontierenden Schuhe zu identifizieren und deren Zustand zu erkennen. Dabei spielen Computer Vision-Systeme eine zentrale Rolle. Die Herausforderung ist die Vielzahl an benötigten Trainingsdaten, um alle Marken, Modelle und Zustände mit hoher Sicherheit erkennen zu können. Eine digitale Produktakte könnte beispielsweise mittels eines RFID-Transponders Daten über die Zusammensetzung des Produktes bereitstellen. Neben der Kombination konventioneller Industriekameras mit Computer Vision können auch spezielle Bildgebungstechnologien wie die Infrarotspektroskopie eingesetzt werden, um die Materialien des vorliegenden Schuhs zu ermitteln und auch den Zustand dieser Materialien abzuschätzen. Auf Basis dieser Daten können die weiteren Prozessschritte geplant und durchgeführt werden.

Sortierung. Abhängig vom Business Case und den Fähigkeiten des Demontagesystems sind verschiedene Arten der Sortierung denkbar: Eine produktseitige Herausforderung liegt in der Erkennung und Sortierung nach Marke, Materialzusammensetzung oder Schuhaufbau. Beispielsweise könnte ein herstellereigenes Logistiksystem mit einer für die Kund:innen einfachen Annahmestelle für gebrauchte Schuhe die Varianz bereits im

Vorhinein deutlich reduzieren. Zusätzlich muss eine Sortierung nach Produktzustand erfolgen, welcher die Rückführungsart maßgeblich bestimmt. Möglich sind die Unterscheidung in eine vollständige Demontage (Recycling oder Remanufacturing), die Demontage von Komponenten (für z. B. Repair) oder gar der Wegfall einer Demontage (Resell).

Handhabung. Die Handhabung des Schuhs – eines halbweichen, verformbaren Objekts – ist eine zentrale Herausforderung, da jede automatisierte Operation einen Gegendruck von der Innenseite des Schuhs erfordert. So kann die Zuverlässigkeit und Stabilität des Prozesses gewährleitet werden. In der automatisierten Herstellung von Schuhen werden Leisten genutzt, d. h. Formstücke aus hochdichtem Kunststoff, die menschlichen Füßen nachempfunden sind. Sie garantieren die definierte Positionierung der Materialien und bieten den erforderlich gleichmäßigen Gegendruck im Montageprozess. Da Leisten jedoch nur für einzelne Modelle spezifisch genutzt werden können und es nicht möglich ist, sie in einen fertigen Schuh wiedereinzuführen, wird aktuell an flexibel ausdehnbaren Leisten geforscht. Dazu hat PCH Innovations für Nike's *Bot Initiated Longevity Lab Anlage* einen, in einer Richtung ausdehnbaren, Leisten entwickelt. Ein allgemein anwendbarer Leisten sollte in mehrere Richtungen ausdehnbar sein und potenziell intelligente, programmierbare, formverändernde Materialien verwenden.

Demontage. Zuletzt ist die eigentliche Demontage mit gegebenenfalls ergänzenden Aufarbeitungsschritten, wie Reparaturmaßnahmen, durchzuführen. Auch hier steht die Handhabung von Werkzeugen im Vordergrund: Zunächst müssen Werkzeuge, mit denen einzelne Materialschichten entfernt werden, koordiniert werden; neben dem Schneiden kommen das Schleifen, Saugen, der Einsatz von Wärme oder chemische Separationstechnologien zum Einsatz. Die dadurch gewonnenen, flexiblen und verformbaren Materialschichten müssen einzeln behandelt und zu ihren jeweiligen Materialströmen oder den nächsten Prozessschritten der Demontage zugeführt werden. Das Ziel ist es, mit einer möglichst geringen Anzahl von eingesetzten Werkzeugen eine Vielzahl von Materialien und Technologien abdecken zu können. Dies erfordert die Entwicklung von maßgeschneiderten Endeffektoren und Greifern für die entsprechenden Robotersysteme, die sich an die Bedürfnisse der verschiedenen Schuharten und Materialien anpassen.

Herausforderungen und nächste Schritte

Aufgrund der hohen Varianz in Schuhmodellen und der Diversität der Zustände hat die Identifikation dieser die höchste Priorität für die Entwicklung und Implementierung industrieller Wiederaufbereitungsverfahren. Obwohl Computer Vision-Systeme in der Erkennung von Varianten und Materialeigenschaften präziser werden, ist die Unterstützung mit Daten auch weiterhin sinnvoll und notwendig. Schuhe verfügen gewöhnlich jedoch nicht über eingebettete Sensoren, was die Bestimmung des Produktzustandes erschwert. Eine realistische Option stellt das Einbetten eines RFID-Transponders oder Speichers dar, der direkt Informationen über die eingesetzten Materialeigenschaften oder sogar Demontageinstruktionen zur Verfügung stellt, die die Planung der Demontageschritte unterstützen. Auch in der Demontage selbst gibt es technische Herausforderungen. Wenn nicht nur die Reparatur, sondern das Zurückführen aller Materialien in eigene Materialströme betrachtet wird, müssen die Stoffe dekontaminiert oder von Kleberesten gereinigt werden. Dies ist aktuell nur bedingt möglich. Generell muss bereits die Schuhproduktion über "Design for Disassembly"-Ansätze stärker auf eine Demontage ausgelegt werden. Schlussendlich ist die Realisierung eines Demontagesystems für Schuhe nicht zuletzt abhängig vom tatsächlichen Business Case. Ohne eine gesetzlich geforderte Rücknahmepflicht oder ohne eindeutigen Kundenwunsch sind momentan die Voraussetzungen für einen weitreichenden Einsatz von Demontagesystemen für Schuhe noch nicht gegeben. Eine Regulierung

der verwendeten Materialien in Richtung Demontierbarkeit oder über entsprechende Recyclingquoten können Hersteller jedoch jetzt schon zu einer schnelleren Umsetzung motivieren.

4.4 Zusammenfassung des aktuellen Status Quo aus Sicht der Unternehmen

Strategien zur Kreislaufwirtschaft sollen im Sinne der ganzheitlichen nachhaltigen Produktion sowohl ökologische als auch ökonomische Ziele fördern. Wie in den Use Cases dargestellt ist, werden die Potenziale der Kreislaufwirtschaft von der Industrie anerkannt und gefördert. Neue regulatorische Bestimmungen sind wichtige Treiber für die Entwicklung zur Kreislaufwirtschaft. Vor allem hat die stetig steigende Kundenbereitschaft für aufbereitete Produkte einen starken positiven Einfluss auf diese Entwicklung. Auch eröffnet Kreislaufwirtschaft neue Geschäftsperspektiven, indem sich Unternehmen im Wettbewerb durch das Angebot von Second-Life Produkten differenzieren können. Folglich steigt zurzeit die Implementierungsgeschwindigkeit für die Umsetzung von industriellen Systemen zur Wiederaufarbeitung stark an, sodass die Gestaltung von De- und Remontagesystemen zu einem zentralen Anliegen wird.

Da sich die vorgestellten Use Cases in der frühen Umsetzungsphase befinden, werden De- und Remontagetätigkeiten aktuell zumeist manuell ausgeführt. Dies bietet die Vorteile, dass selbst individuelle Produktzustände entsprechend bearbeitet werden und die Unternehmen Erfahrungen in der Demontage sammeln können. Aufgrund der hohen Varianz von Produkttypen und -zuständen ist eine regelbasierte Automatisierung von Demontagesystemen nicht ausreichend. Vielmehr benötigt die Demontage für die weitere Skalierung Prozessautomatisierung bei gleichzeitig hoher Adaptivität, die mithilfe von verfügbaren Daten sowie von Sensorik und KI-Systemen umzusetzen ist.

Vergleicht man die Use-Cases im Hinblick auf die vorgestellten Merkmale von Demontagesystemen, sind Unterschiede bezogen auf die Demontagetiefe und den Zerstörungsgrad festzustellen. Eine Gemeinsamkeit der drei diskutierten Anwendungsfälle ist der Bedarf nach einer hohen Prozessadaptivität. Im Falle des Refurbishment von Waschmaschinen kann die Prozessadaptivität bisher durch manuelle Tätigkeiten abgebildet werden. Für die Demontage der PKW-Batteriekästen bietet die Modularität Potenzial, Prozessadaptivität im industriellen Maßstab umzusetzen. Systemadaptivität ist bei dem frühen Stadium zunächst nicht als zentraler Fokus gesetzt; perspektivisch wird diese Eigenschaft jedoch von großer Bedeutung für die Gestaltung von Demontagesystemen sein, da Produkt- und Technologiezyklen kürzer werden und Variantenzahlen steigen. Während die Kreislaufstrategien in den Unternehmen als strategisches Thema angekommen sind, verbleiben eine Vielzahl von Herausforderungen, die durch entsprechende Befähigertechnologien zu lösen sind.

5 Fazit

Effiziente Ressourcennutzung und die Erweiterung der Produktlebenszyklen stellen eine zentrale Perspektive für nachhaltig ausgerichtete Unternehmen dar. Die Bestrebungen der EU, Kreislaufwirtschaft zu etablieren, geben Unternehmen einen zusätzlichen Anstoß frühzeitig nachhaltige Systeme umzusetzen, und eröffnen zudem neue Geschäftsperspektiven. Die Möglichkeit zur Ausweitung von Wiederaufarbeitungsprozessen im industriellen Maßstab allerdings wird erst durch eine Etablierung von automatisierten Demontagesystemen geschaffen. Aufgrund der hohen Produkt- und Zustandsvarianz ist eine regelbasierte Automatisierung der Systeme jedoch nicht ausreichend, sondern muss durch adaptive Fähigkeiten erweitert werden.

Auf Basis der Motivation (Kapitel 1) und den grundlegenden Begrifflichkeiten zur Kreislaufwirtschaft (Kapitel 2) beschreibt dieser Beitrag ein Zielbild eines adaptiven Demontagesystems und seinen Charakteristiken, um die Schließung von Ressourcenkreisläufen zu unterstützen (Kapitel 3). Kernstück des Beitrages sind die vorgestellten Use Cases „Refurbishmentprozesse der Second-Life Waschmaschinen“, „Demontage von PKW-Batteriekästen“ und „Remanufacturing von Freizeitschuhen“ (Kapitel 4). Während einige Überlegungen produktspezifisch sind, können dennoch übergreifende Gemeinsamkeiten und Herausforderungen für die Umsetzung der adaptiven automatisierten Demontage festgestellt werden. Im Folgenden werden die weiteren Handlungsfelder für die adaptive automatisierte Demontage und die benötigten Befähigertechnologien als Ausblick aufgezeigt.

Um in der Wiederaufbereitung auf starke Schwankungen reagieren zu können, müssen qualitativ hochwertige und konsistente Daten verfügbar sein. Produktvariante und -zustand dienen als Entscheidungsfundament. Eine automatisierte Zustandsbewertung kann die Wirtschaftlichkeit der Bewertung steigern: Aufgenommene Daten von z. B. Tiefenkameras können KI-Modelle für die Bauteilklassifikation trainieren, und somit die Varianz des Produktzustands vom Ursprungszustand automatisiert bestimmen.

Auch die Prozesse müssen adaptiv auf die Zustandsbestimmungen reagieren. Hierfür müssen Maschinen ihren Handlungsablauf durch eigene Schlussfolgerungen bestimmen können, anstatt einer festgelegten Anweisungssequenz von außen zu folgen. Insbesondere Sensoren wie Laserscanner und Tiefenkameras ermöglichen Prozessüberwachungen oder adaptive Werkzeugpositionierungen. 5G-Mobilfunkstandard und Edge Computing unterstützen Sensordatenverarbeitung in zentralen Rechenzentren, sodass leistungsstarke Robotiksteuerungen und KI-Algorithmen kostengünstig für Roboterflotten verfügbar gemacht werden. Durch adaptive automatisierte Prozesse wird die Zustandsvarianz industriell kontrollierbar gemacht.

Die aufgeführten Handlungsfelder sind vor allem im kurz- und mittelfristigen Umfeld der Industrie anzusiedeln. Es verbleiben jedoch auch Aufgaben, die längerfristig und in Zusammenarbeit mit mehreren Akteuren zu lösen sind:

Übergeordnet stellen Konzepte der Datenaufnahme und -nutzung eine langfristig bedeutende Aufgabe dar. Zwar sind wie beschrieben bereits jetzt Daten die Grundlage für alle Handlungen in adaptiven Prozessen. Anstatt diese jedoch in Zustandsbewertungen aufwendig zu erheben, sollen perspektivisch die notwendigen Daten bereits mit dem Produkt zurück in die Fabrik gelangen. Für Daten über den Aufbau und die verwendete Materialien ist die digitale Produktakte eine Möglichkeit, die im Beitrag „Re-Manufacturing Green Factory“ näher vorgestellt wird. Zum anderen können Daten aus dem gesamten Produktlebenszyklus - und insbesondere aus der Nutzung – verwendet werden, um Aufschluss über den Produktzustand zu geben. Ziel ist es, in Kombination mit prädiktiven Algorithmen Entscheidungen für die Wiederaufbereitung zu treffen, um der Varianz des Produktzustands optimal begegnen zu können.

Zudem sind Industrie, Forschung und Gesetzgeber gleichermaßen gefordert, Anforderungen an aufgearbeitete Produkte zu standardisieren, um Markt und Qualitätsansprüche der Kund:innen zusammenzubringen. Auch erleichtern Standardisierungen in den Produkten die Demontage, indem die Varianz zwischen den Produkttypen von Beginn an verringert wird. Schließlich verbleiben rechtliche Fragestellungen, die durch den Gesetzgeber zu lösen sind. Dies betrifft die Speicherung und Verarbeitung der Nutzungsdaten

aus dem Produktlebenszyklus. Weiterhin sind auch Haftungsfragen für wiederaufgearbeitete Produkte auf rechtlicher Ebene festzuschreiben. Die Handlungsfelder lassen sich zusammenfassen in:

- Produkt- und Nutzungsdatenerhebung über den gesamten Produktlebenszyklus
- Automatisierte Zustandsbewertungen
- Adaptive und automatisierte Demontageprozesse befähigt durch Sensor- und KI-Systeme
- Standardisierung und Modularität für „Design for Disassembly“
- Rechtlicher Rahmen für die Datenspeicherung aus der Nutzungsphase

Aus übergeordneter Perspektive ist festzustellen, dass nicht eine einzelne Lösung, sondern eine Vielzahl verschiedener Handlungsfelder parallel zu verfolgen ist, um industrielle Systeme zur Wiederaufbereitung umzusetzen. Ebenso wie Montagelinien spezialisiert und mit hoher Genauigkeit arbeiten, aber erst durch die großen Stückzahlen wirtschaftlich agieren, gelten diese Anforderungen auch für Demontagesysteme. Diese müssen jedoch in den Aufbereitungsprozessen eine viel größere Varianz handhaben können, sodass Adaptivität als zentrale Eigenschaft ermöglicht werden muss. Die konkrete Ausgestaltung von Ressourcenkreisläufen erfordert vielfältige technologische, aber auch strategische Bestandteile. Auf diese Weise trägt die adaptive automatisierte Demontage dazu bei, Ressourcen in einer Vielzahl von Produktlebenszyklen mit zusätzlichen Wertschöpfungsmöglichkeiten zu verwenden.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC-2023 Internet of Production – 390621612.

6 Literatur

[1] S. Bonafé, „Die Bedeutung des Kreislaufwirtschaftsmodells: Die Beschleunigung des Übergangs zu einem Kreislaufwirtschaftsmodell ist keine Option, sondern eine zwingende Entscheidung," in *Kreislaufwirtschaft in der EU. Eine Zwischenbilanz*, S. Eisenriegler, Hg., Wiesbaden: Springer Gabler, 2020, S. 63–65.

[2] Deloitte und Bundesverband der Deutschen Industrie. „Zirkuläre Wirtschaft. Herausforderungen und Chancen für den Industriestandort Deutschland." deloitte.com. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/risk/Zirkul%C3%A4re%20Wirtschaft%20Studie_Deloitte%20und%20BDI.pdf (Zugriff am: 24. Feb. 2023).

[3] Europäische Kommission. „Änderung unserer Produktions- und Verbrauchsmuster: neuer Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft ebnet Weg zu klimaneutraler und wettbewerbsfähiger Wirtschaft mit mündigen Verbrauchern." ec.europa.eu. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_20_420 (Zugriff am: 24. Feb. 2023).

[4] Europäische Kommission. „Europäischer Grüner Deal: Erster klimaneutraler Kontinent werden." commission.europa.eu. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de (Zugriff am: 24. Feb. 2023).

[5] Europäische Kommission. „Der Grüne Deal: Neue Vorschläge, um nachhaltige Produkte zur Norm zu machen und Europas Ressourcenunabhängigkeit zu stär-ken." ec.europa.eu. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_22_ 2013 (Zugriff am: 24. Feb. 2023).

[6] M. Fraser *et al.* „The Circularity Gap Report 2023." circularity-gap.world. https://www.circularity-gap.world/2023#download (Zugriff am: 24. Feb. 2023).

[7] A. von Wecus und K. Willeke, „Status quo der Ressourceneffizienz im Mittelstand: VDI ZRE Publikationen: Studie," 2015. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/Studie_VDI_ZRE_Status_quo_Ressourceneffizienz_2015.pdf

[8] C. Herrmann und O. Vetter, „Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands: Remanufacturing von Produkten," 2021. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/VDI-ZRE_Studie_Remanufacturing_Web_bf.pdf

[9] S. Baazouzi, F. P. Rist, M. Weeber und K. P. Birke, „Optimization of Disassembly Strategies for Electric Vehicle Batteries," *Batteries*, Jg. 7, Nr. 4, Art.-Nr. 74, 2021, doi: 10.3390/batteries7040074.

[10] E. Westkämper und C. Löffler, *Strategien der Produktion: Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.

[11] J. R. Duflou, G. Seliger, S. Kara, Y. Umeda, A. Ometto und B. Willems, „Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study," *CIRP Annals*, Jg. 57, Nr. 2, S. 583–600, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.009.

[12] M. Has, *Sustainable Products: Life Cycle Assessment, Risk Management, Supply Chains, Eco-Design*. Berlin, Boston: De Gruyter, 2022.

[13] S. Del-Aguila-Arcentales, A. Alvarez-Risco und S. Senthilkannan Muthu, „Measuring Circular Economy," in *Circular Economy: Impact on Carbon and Water Footprint*, A. Alvarez-Risco, S. S. Muthu und S. Del-Aguila-Arcentales, Hg., Singapore: Springer, 2022, S. 3–17.

[14] D. Reichert, C. Cito und I. Barjasic, *Lean & Green: Best Practice: Wie sich Ressourceneffizienz in der Industrie steigern lässt*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2018.

[15] A. Kropp, *Grundlagen der Nachhaltigen Entwicklung: Handlungsmöglichkeiten und Strategien zur Umsetzung* (essentials). Wiesbaden: Springer, 2019.

[16] C. N. Madu *et al.,* „Systems Design and Innovations in Circular Economy: The Industry and Business Perspective," in *Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing*, C. N. Madu, Hg., 2. Aufl. Cham: Springer, 2022, S. 27–38.

[17] H. Holzinger, „Mehr Effizienz allein reicht nicht: Potenziale und Grenzen von Kreislaufwirtschaft," in *Kreislaufwirtschaft in der EU: Eine Zwischenbilanz*, S. Eisenriegler, Hg., Wiesbaden: Springer Gabler, 2020, S. 195-216.

[18] S. Blömeke, J. Rickert, M. Mennenga, S. Thiede, T. S. Spengler und C. Herrmann, „Recycling 4.0 – Mapping smart manufacturing solutions to remanufacturing and recycling operations," *Procedia CIRP*, Jg. 90, S. 600–605, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.045.

[19] M. H. G. Kraft, O. Christ und L. Scherer, *Management der Kreislaufwirtschaft: Positionierung und Gestaltung zirkulärer Unternehmen* (essentials). Wiesbaden: Springer, 2022.

[20] J. H. Becker, „Cradle to Cradle als neue Philosophie der nachhaltigen Produktentwicklung," in *Praxishandbuch Nachhaltige Produktentwicklung: Ein Leitfaden mit Tipps zur Entwicklung und Vermarktung nachhaltiger Produkte*, U. Scholz, S. Pastoors, J. H. Becker, D. Hofmann und R. van Dun, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2018, S. 31–38.

[21] P. Lacy, J. Long und W. Spindler, *The Circular Economy Handbook: Realizing the Circular Advantage*. London: Palgrave Macmillan, 2020.

[22] J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell und A. Hanemaaijer. „Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain: Policy Report." pbl.nl. https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf (Zugriff am: 24. Feb. 2023).

[23] Ellen MacArthur Foundation, „Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition: Vol 1," 2013. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an

[24] J. Kirchherr, D. Reike und M. Hekkert, „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions," *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 127, S. 221–232, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

[25] A. Zühlsdorff, „Stoffrecht," in *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft*, P. Kurth, A. Oexle und M. Faulstich, Hg., 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022, S. 211–234.

[26] G. Ferrer und D. C. Whybark, „Communicating Product Recovery Activities: Processes, Objectives, and Performance Measures," in *Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing*, C. N. Madu, Hg., 2. Aufl. Cham: Springer, 2022, S. 39–48.

[27] C. N. Madu, „Sustainable Manufacturing: Strategic Issues in Green Manufactur-ing," in *Handbook of Environmentally Conscious Manufacturing*, C. N. Madu, Hg., 2. Aufl. Cham: Springer, 2022, S. 1–11.

[28] S. H. Gheewala und T. Silalertruksa, „Life Cycle Thinking in a Circular Economy," in *An Introduction to Circular Economy*, L. Liu und S. Ramakrishna, Hg., Singapore: Springer, 2021, S. 35–53.

[29] D. Parker *et al.,* „Remanufacturing Market Study: For Horizon 2020, grant agreement No 645984, November 2015," 2015. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic ?documentIds=080166e5a4bc7898&appId=PPGMS

[30] J. Yang, *From Zero Waste to Material Closed Loop: The Way Towards Circular Economy*. Singapore: Springer, 2022.

[31] W. R. Stahel, „History of the Circular Economy. The Historic Development of Circularity and the Circular Economy," in *The Circular Economy in the European Union: An Interim Review*, S. Eisenriegler, Hg., Cham: Springer, 2020, S. 7–19.

[32] K. Wegener, S. Andrew, A. Raatz, K. Dröder und C. Herrmann, „Disassembly of Electric Vehicle Batteries Using the Example of the Audi Q5 Hybrid System," *Procedia CIRP*, Jg. 23, S. 155–160, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.10.098.

[33] S. Bräuer und A. Stieger, „End-of-Life-Strategien für Traktionsbatterien," in *Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien: Szenarien, Dienstleistungen und Entscheidungsunterstützung*, J. Becker, D. Beverungen, M. Winter und S. Menne, Hg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019, S. 21–123.

[34] P. Burggräf, J. Wagner, F. Steinberg, B. Heinbach, M. Wigger und T. Saßmannshausen, „Life Cycle Assessment for Adaptive Remanufacturing: incorporating ecological considerations into the planning of maintenance activities – a case study in the German heavy machinery industry," *Procedia CIRP*, Jg. 105, S. 320–325, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.053.

[35] M. Hochwallner, E. Sundin und K. Johansen, „Automation in Remanufacturing: Applying Sealant on a Car Component," in *SPS2022: Proceedings of the 10th Swedish Production Symposium* (Advances in Transdisciplinary Engineering 21), A. H. C. Ng, A. Syberfeldt, D. Högberg und M. Holm, Hg., Amsterdam: IOS Press, 2022, S. 147–158, doi: 10.3233/ATDE220134.

[36] R. Schmitt *et al.,* „Frei verkettete wandlungsfähige Montage," in *29. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017: Internet of Production für agile Unternehmen, 18. bis 19. Mai*, G. Schuh, C. Brecher, F. Klocke, R. Schmitt, Hg., 2017, S. 339–368.

[37] K. Feldmann, S. Trautner und O. Meedt, „Innovative disassembly strategies based on flexible partial destructive tools," *Annual Reviews in Control*, Jg. 23, S. 159–164, 1999, doi: 10.1016/S1367-5788(99)90079-2.

[38] N. Nasr, C. Hughson, E. Varel und R. Bauer, *State-of-the-art assessment of remanufacturing technology*. New York: Rochester Institute of Technology, 1998.

[39] A. Priyono, W. Ijomah und U. Bititci, „Disassembly for Remanufacturing: A Systematic Literature Review, New Model Development and Future Research Needs," *Journal of Industrial Engineering and Management*, Jg. 9, Nr. 4, S. 899–932, 2016, doi: 10.3926/jiem.2053.

[40] K. von Westernhagen, *Planung und Steuerung der Retro-Produktion*. Essen: Vulkan-Verlag, 2001.

[41] M. Porta, F. Sebastiani, M. Santochi und G. Dini, „Destructive Disassembly of End-of-Life Household Appliances: A Structured Analysis of Cutting Methods of the Housing," in *AMST'05: Proceedings of the Seventh International Conference,* E. Kuljanic, Hg., Wien: Springer, 2005, S. 653–662.

[42] M. Nave, *Beitrag zur automatisierten Demontage durch Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen*, Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Dortmund, Dortmund, 2003. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: http://dx.doi.org/10.17877/DE290R-14924.

[43] O. Sauer und J. Jasperneite, "Adaptive information technology in manufacturing," in *New worlds of manufacturing: proceedings of the 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems: University of Wisconsin, Madison, USA, 1 - 3 June 2011*, N. A. Duffie, Hg., 2011. Zugriff am: 24. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Juergen-Jasperneite/publication/273456159_Adaptive_information_technology_in_manufacturing/links/5502f3520cf231de076fc9a8/Adaptive-information-technology-in-manufacturing.pdf?origin=publication_detail

[44] W. Günthner, E. Klenk und P. Tenerowicz-Wirth, „Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0," in *Handbuch Industrie 4.0: Bd. 4: Allgemeine Grundlagen* (Springer Reference Technik), B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. ten Hompel, Hg., 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 99–125.

[45] F. Kneer, E. Kamsties und K. Schmid, „Environment Modeling for Adaptive Systems: A Systematic Literature Review," 2020. [Online]. Verfügbar unter: arXiv:2011.07892.

[46] T. Stehle und U. Heisel, „Konfiguration und Rekonfiguration von Produktionssystemen," in *Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation*, D. Spath, E. Westkämpfer, H.-J. Bullinger und H.-J. Warnecke, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 333–367.

[47] S. L. Soh, S. K. Ong und A. Y. C. Nee, „Design for Disassembly for Remanufacturing: Methodology and Technology," *Procedia CIRP*, Nr. 15, S. 407–412, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.053.

[48] R. Bogue, „Design for disassembly: A critical twenty‐first century discipline," *Assembly Automation*, Jg. 27, Nr. 4, S. 285–289, 2007, doi: 10.1108/01445150710827069.

[49] D. Krause und N. Gebhardt, *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.

[50] G. Michalos, S. Makris, N. Papakostas, D. Mourtzis und G. Chryssolouris, „Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Jg. 2, Nr. 2, S. 81–91, 2010, doi: 10.1016/j.cirpj.2009.12.001.

[51] R. Möhlmann und C. Engel. „Aus alt mach neu: Ein zweites Leben für Fahrzeug-Bauteile," *Forschung Kompakt,* Nr. 4, 2022, https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/presse-medien/2022/april/ipk-aus-alt-mach-neu-ein-zweites-leben-fuer-fahrzeug-bauteile.pdf (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

[52] S. Vongbunyong und W. H. Chen, *Disassembly Automation: Automated Systems with Cognitive Abilities*. Cham: Springer, 2015.

[53] H.-J. Kim, S. Kernbaum und G. Seliger, „Emulation-based control of a disassembly system for LCD monitors," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 40, Nr. 3-4, S. 383–392, 2009, doi: 10.1007/s00170-007-1334-z.

[54] B. Basdere und G. Seliger, „Disassembly Factories for Electrical and Electronic Products To Recover Resources in Product and Material Cycles," *Environmental Science & Technology*, Jg. 37, Nr. 23, S. 5354–5362, 2003, doi: 10.1021/es034555g.

[55] J. Fleischer, E. Gerlitz, S. Rieß, S. Coutandin und J. Hofmann, „Concepts and Requirements for Flexible Disassembly Systems for Drive Train Components of Electric Vehicles," *Procedia CIRP*, Jg. 98, S. 577–582, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.154.

[56] U. Nehmzow, *Mobile Robotik: Eine praktische Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002.

[57] E. Hering und G. Schönfelder, *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012.

[58] T. Heller, M. Duisberg, M. Kranz und B. A. Latos. „Montageorganisationsformen." toolbox.flexdemo.eu. https://toolbox.flexdemo.eu/uploads/medien/2021/08/09/Montageorganisationsformen_Bg.pdf (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

[59] Ford Motor Credit Company LLC. „Current Report: Pursuant to Section 13 or 15(d) of the Securities Exchange Act of 1934." d18rn0p25nwr6d.cloudfront.net. https://d18rn0p25nwr6d.cloudfront.net/CIK-0000038009/2fd06f5b-1d25-4ba1-9ca9-ac261f33fd60.pdf (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

[60] Europäisches Parlament. „Fit für 55: neue Pkw und leichte Nutzfahrzeuge ab 2035 emissionsfrei." europarl.europa.eu. https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20230210IPR74715/fit-fur-55-neue-pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge-ab-2035-emissionsfrei (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

[61] Tagesschau. „Ab 2030 in Europa: Ford will nur noch Elektroautos anbieten." tagesschau.de. https://www.tagesschau.de/wirtschaft/ford-elektroautos-europa-101.html (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

[62] Europäisches Parlament. „Neue EU-Vorschriften für nachhaltigere und ethisch bedenkenlose Batterien." europarl.europa.eu. https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2022/3/story/20220228STO24218/20220228STO24218_de.pdf (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

Die Inhalte für den Vortrag 1.2 erarbeiteten die Autor:innen mit weiteren Expert:innen in dieser Arbeitsgruppe:

Dr. Frank Balzereit, Ford, Region Köln/Bonn
Lukas Bergs, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr. Jan Bitter-Krahe, Wuppertal Institute, Region Köln/Bonn
Kristof Briele, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Michael Drechsel, Intelligent Energy System Services GmbH, Ingolstadt
Juliane Elsner, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Maik Frye, Fraunhofer IPT, Aachen
Immanuel Geyer, MHP Management- und IT-Beratung GmbH, Ludwigsburg
Dr. Amon Göppert, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr. Thilo Greshake, MHP Management- und IT-Beratung GmbH, München
Dr. Tobias Häring, Intelligent Energy System Services GmbH, Waltenhofen
Christian Kokott, PCH Innovations, Berlin
Andé Knörig, PCH Innovations, Berlin
Dev Mishra, PCH Innovations, Berlin
Guido Nilgen, Miele & Cie. KG, Euskirchen
Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen
Dr. Sebastian Schmitt, Viega Group, Düsseldorf
Felix Sohnius, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

1.3 Neue Modularität und Technologie-Roadmapping

G. Schuh, M. Kuhn, A. Keuper, M. Patzwald, L. Schenk, D. Guo, M. Feucht, J. Kantelberg, G. Rossmair, H. Schroth, U. Viethen, P. Zeller

Gliederung

1 Einleitung 98
1.1 Warum Effizienzsteigerungen nicht ausreichen 98
1.2 Die Circular Economy als grüner Nordstern 98
1.3 Paradigmenwechsel der Produktmodularisierung und Technologieplanung 102
2 Realisierung kreislauffähiger Produkte 108
2.1 Märkte und Kund:innen in der Circular Economy verstehen 108
2.2 Technologiesprünge in der Circular Economy antizipieren 110
2.3 Produktarchitektur für kreislauffähige Produkte entwickeln 114
2.4 Technologiebetrachtung vertikal und horizontal erweitern 116
3 Zusammenfassung und Ausblick 119
4 Literatur 122

doi: 10.24406/publica-960

Kurzfassung

Neue Modularität und Technologie-Roadmapping

Durch einen Fokus auf Recycling, geringere Energieverbräuche und verminderten Einsatz umweltschädlicher Rohstoffe kann die Nachhaltigkeit nur bis zu einem gewissen Grad gesteigert werden und erfordert meist die Kompensierung damit einhergehender Kosten. Ein Umdenken und eine radikale Transformation der Wertschöpfung hin zur Zirkularität bieten demgegenüber ökonomische Potenziale, die den Status-Quo deutlich übersteigen. Der Hebel dafür ist die aktive Verlängerung von Kreisläufen und die Wertsteigerung durch das *Upgraden* von Produkten während der Nutzungsphase. Dies schafft die Möglichkeit der kontinuierlichen Monetarisierung von Upgrade-Potenzialen, während eine ressourcenausschöpfende Wertsteigerung über die Lebenszyklen eine ganzheitliche ökologische Nachhaltigkeit erreichbar macht.

Schlüssel zu diesem Paradigmenwechsel liegen in der Produktmodularisierung und Technologieplanung. Zur Realisierung kreislauffähiger Produkte müssen diese verstärkt integriert und synchronisiert werden. Um heute und morgen ökologische und ökonomisch nachhaltige Leistungen anzubieten, ist ein Verständnis über Märkte und Kund:innen der Circular Economy notwendig. Außerdem erfordern die regelmäßigen Upgrades ein frühzeitiges Antizipieren relevanter Technologiesprünge. Unter Berücksichtigung dieser beiden Blickrichtungen muss eine Produktarchitektur für kreislauffähige Produkte entwickelt und die Technologiebetrachtung vertikal (um Re-X-Technologien) sowie horizontal (um Remanufacturing und Modul-Upgrades) erweitert werden.

Schlagwörter: Circular Economy, Produktmodularisierung, Technologie-Roadmapping, Green Growth

Abstract

New Modularity and Technology Roadmapping

By focusing on recycling, lower energy consumption and reduced use of environmentally harmful (raw) materials, sustainability can only be increased to a certain extent and usually requires compensation for the associated costs. In contrast, a change in thinking and a radical transformation of the value creation towards a circular economy offer superior ecological and economic potential. This is realized by an active extension of utilization cycles and the continuous increase in product value through upgrades during the utilization phase, creating the possibility of recurring monetization.

Accordingly, the key to this paradigm shift lies in a new product modularization for the realization of a circular economy and in extended technology planning to anticipate the required flexibility and upgrades. Therefore, the goal of modularization is no longer the realization of economies of scale but enabling the value-enhancing extension of product lifetimes through module upgrades and replacements. This means that technology planning should no longer focus exclusively on new products, but in particular also on upgrades for existing products. As a consequence, holistic circularity roadmaps are emerging instead of roadmaps for individual products.

Keywords: Circular Economy, Product Modularization, Technology Planning, Green Growth

1 Einleitung

1.1 Warum Effizienzsteigerungen nicht ausreichen

„Take, Make, Waste“ - diese bisher vorherrschende Produktions- und Konsumlogik führt unseren Planeten unverkennbar an seine Belastbarkeitsgrenzen. Der Verbrauch an natürlichen Ressourcen im globalen Durchschnitt liegt um den Faktor 1,75 über dem, was unsere Erde an erneuerbaren Ressourcen bereitstellt und lässt nicht am dringenden Handelsbedarf zweifeln [1]. Auch der Blick nach Deutschland, wo der Faktor der Ressourcenüberbeanspruchung der Erde bei Faktor 3 liegt [2], verdeutlicht die Notwendigkeit das heutige lineare Wirtschaften - im deutschen Sprachgebrauch wird pointiert auch von „Wegwerfgesellschaft“ gesprochen - zeitnah fundamental zu transformieren. Reagiert wird auf diese besorgniserregenden Auswirkungen des linearen Wirtschaftens mit Effizienzsteigerung und dem Einsatz umweltfreundlicher Substitute zur Minderung globaler Probleme, die auch erste Fortschritte erzielen können. Jedoch bringt jedes lineare Wirtschaftssystem, welches auf dem Verbrauch endlicher Ressourcen basiert, negative ökologische Auswirkungen entlang der gesamten Materialkette mit sich. Um eine wirkliche Entkopplung wirtschaftlicher Tätigkeiten vom Ressourcenverbrauch realisieren zu können, bedarf es eines Umdenkens zu einem systematischen Ansatz, der Wertschöpfung ohne Ressourcenverbrauch ermöglicht. [3]–[6]

1.2 Die Circular Economy als grüner Nordstern

Nach der ELLEN MACARTHUR FOUNDATION [7] ist eine *Circular Economy* ein industrielles System, das von seiner Absicht und seinem Design her restaurativ bzw. regenerativ ist. Es ersetzt das "End-of-Life"-Konzept durch Wiederherstellung, setzt auf die Nutzung erneuerbarer Energien, eliminiert die Verwendung schädigender Chemikalien, welche die Wiederverwendung beeinträchtigen, und strebt die Beseitigung von Abfällen durch eine überlegene Gestaltung von Materialien, Produkten, Systemen und Geschäftsmodellen an. Dieses ideale Wirtschaftssystem lässt sich durch folgende drei Kernpunkte charakterisieren:

1. Die Realisierung von Produkten aus recycelten und nachwachsenden Rohstoffen, hergestellt mit erneuerbaren Ressourcen und ohne bzw. mit minimaler Belastung der Umwelt
2. Optimale Nutzungsphasen über mehrere Lebenszyklen und damit einhergehend eine systematische Rückführung von Produkten und Komponenten in Kreisläufen
3. Schaffung von ökologischen und ökonomischen Mehrwerten sowohl für die Kund:innen als auch für das eigene Unternehmen und betroffene Stakeholder

Dieser grüne Nordstern ist also geprägt durch einen hohen ökologischen und ökonomischen Nutzen, gleichzeitig jedoch auch durch eine signifikante Unterscheidung von der heutigen Art und Weise des Handelns und Denkens produzierender Unternehmen.

Um sich effektiv diesem Ziel zu nähern, müssen Unternehmen ausgehend vom Ziel der Circular Economy planen und sowohl die Nachhaltigkeit in ihren bestehenden Kerngeschäften steigern als auch die Potenziale des zirkulären Wirtschaftens erschließen. Nur mit diesem Weitblick können Unternehmen heute in die richtigen Entwicklungen investieren, welche ihnen die Maximierung der ökologischen und ökomoschen Nutzenpotenziale ermöglichen. Eine inkrementelle Entwicklung und Extrapolation der Entwicklungsaktivitäten alleine, ausgehend vom heutigen Kerngeschäft, kann darin resultieren, dass Unternehmen unvorbereitet auf fundamentale Produkt- und Technologieveränderungen reagieren müssen. Wodurch das Risiko wächst, zukünftig disruptiert zu werden. Der Weg

dorthin führt Unternehmen über die synchrone Entwicklung ihrer Fähigkeiten in den vier Potenzialdimensionen Modularisierung, Technologie, Wertschöpfung und Ertrag. Durch die Zusammenführung dieser verschiedenen Potenziale kann es Unternehmen gelingen, den in Abbildung 1 dargestellten Transformationspfad zur Circular Economy erfolgreich zu bestreiten.

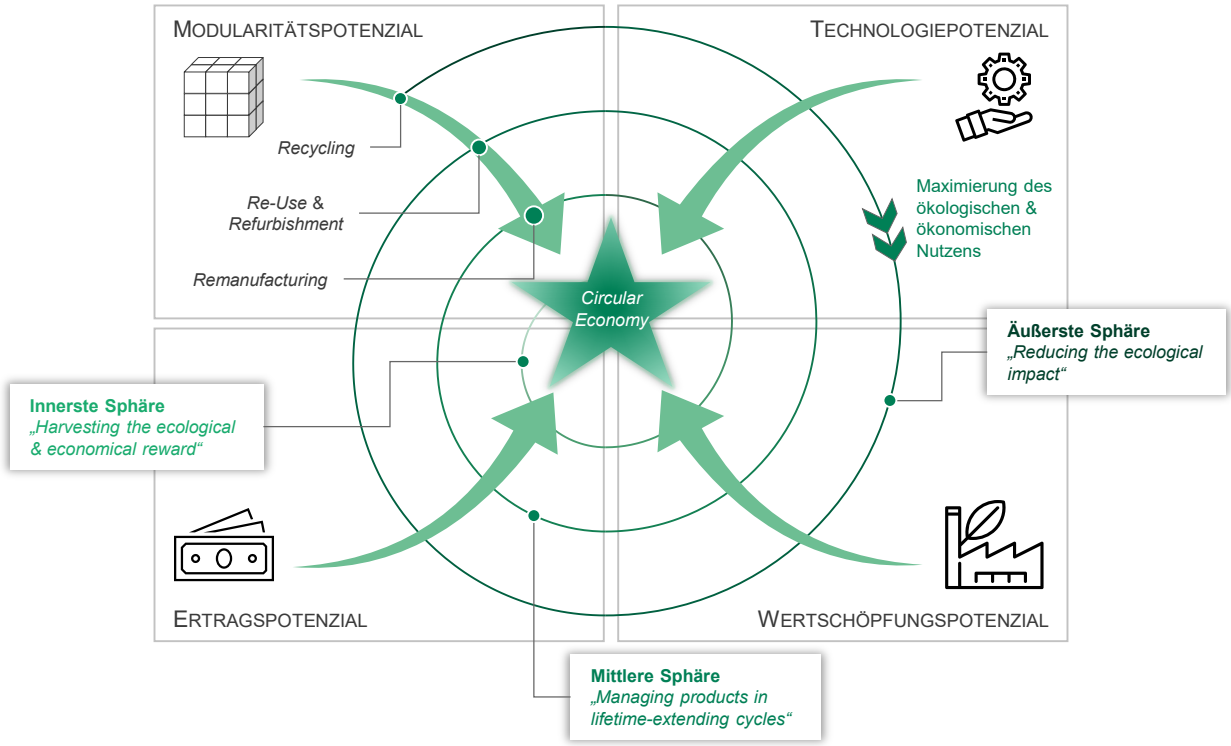


Abbildung 1: Synchronisierung von Modularitäts-, Technologie-, Wertschöpfungs- und Ertragspotenzialen auf dem Weg zur Circular Economy

In der Potenzialdimension Modularisierung werden Potenziale beschrieben, die die Modularisierung auf dem Transformationspfad zur Circular Economy beiträgt. Während zu Beginn der Transformation der Fokus auf der Realisierung von Effizienzsteigerungen durch eine Komplexitätsreduktion liegt, verschiebt sich das Potenzial dahingehend, dass Modularisierung künftig den Austausch von Modulen und somit *Refurbishment* und auch *Remanufacturing* ermöglicht.

Das Technologiepotenzial beschreibt den Beitrag bestehender und künftiger Technologien in der Transformation. Dabei wird zunächst Potenzial durch die Optimierung bestehender Technologien realisiert, welche zu Effizienzsteigerungen führen können, und entlang des Transformationspfades müssen zunehmend neue Technologien entwickelt werden, um die verschiedenen Re-X-Kreisläufe zu ermöglichen und zu verbessern.

Das Wertschöpfungspotenzial beschreibt die zusätzliche Wertschöpfung, die durch die Transformation zur Circular Economy entsteht. Diese liegen insbesondere in der Wiederaufbereitung oder Wertsteigerung von Modulen, wodurch neue Wertschöpfungsschritte entstehen.

Das Ertragspotenzial beschreibt die ökonomischen Potenziale, die durch die Transformation entstehen. Diese leisten einen wichtigen Beitrag zur Beschreitung des Transformationspfades, können jedoch nur bei gleichzeitiger Weiterentwicklung in den drei wei-

teren Dimensionen realisiert werden. Dabei steigt das Potenzial entlang des Transformationspfades von der Realisierung kleinerer Einsparungen und Umsatzsteigerungen hin zu neuen Ertragskanälen durch die Monetarisierung von Produktupgrades und der beschriebenen zusätzlichen Wertschöpfungsschritte.

Von außen nach innen betrachtet, steigt der gebündelte ökologische und ökonomische Nutzen, der realisiert werden kann, an. Für die Realisierung der Wertschöpfungs- und Ertragspotenziale ist jedoch eine gleichzeitige Realisierung der Modularisierungs- und Technologiepotenziale notwendig. Es bedarf daher einer ganzheitlichen Unternehmenstransformation wodurch auf dem Transformationspfad ökologischer und ökonomischer Nutzen sukzessive gleichgerichtet werden und sich bei Erreichen des grünen Nordsterns, der Circular Economy, als synergetisch verstärkende Dimensionen verhalten. Zur genaueren Beschreibung dieses Transformationspfades ist dieser in drei sphärische Durchläufe unterteilt, welche im Folgenden genauer betrachtet werden.

Die äußerste Sphäre – „Reducing the ecological impact"

Die Steigerung der Nachhaltigkeit im Kerngeschäft eines Unternehmens stellt die grundsätzlich erforderlichen Aktivitäten eines Unternehmens dar, um die Nachhaltigkeit unmittelbar zu steigern. Durch einen Fokus auf *Recycling*, geringere Energieverbräuche in der Herstellung und Nutzung sowie einem verminderten Einsatz umweltschädlicher Rohstoffe kann die ökologische Nachhaltigkeit bis zu einem gewissen Grad gesteigert werden. Dazu werden die bestehenden Produkt- und Produktionstechnologien optimiert und die Wertschöpfung möglichst ressourcenschonend gestaltet. Diese Steigerung der ökologischen Nachhaltigkeit geht jedoch nur mit einer begrenzten Steigerung des ökonomischen Nutzens einher, da sich abgesehen von möglichen Einsparungspotenzialen durch effizienteren Ressourceneinsatz oder Umsatzsteigerungen durch Imagegewinn, das grundsätzliche Handeln des Unternehmens nicht gewandelt hat.

Viele Unternehmen verbleiben mit ihren Bemühungen aktuell jedoch bei diesen ersten Zirkularitätsaktivitäten und nehmen eine weitere Steigerung der Nachhaltigkeit als große Herausforderung war. Dabei steigt das Nutzenpotenzial in den nächsten Sphären sogar überproportional an, da sich nun ganz neue Geschäftspotenziale erschließen lassen.

Die mittlere Spähre – "Managing products in lifetime-extending cycles"

Erweitern Unternehmen ihre Recycling- und Optimierungsaktivitäten durch Ansätze des *Re-Use* und *Refurbishment*, sind sie fähig die Lebensdauer ihrer Produkte wertstiftend zu verlängern und Produkte (oder Teile hiervon) in Re-X-Zyklen zu managen. Neben der optimierten Wertschaffung wird eine Werterhaltung (über einen verlängerten Zeitraum) realisiert. Dies bietet die Opportunität, Arbitragepotenziale zwischen degradierenden Produktleben in gewissen diskreten Schritten zu monetarisieren und damit einen ökonomischen Nutzen zu generieren. Erforderlich ist hierfür jedoch die gezielte Weiterentwicklung von Teilen des Kerngeschäfts sowie der zugrundeliegenden Technologien.

Das volle Nachhaltigkeitspotenzial schöpfen Unternehmen aber auch dann noch nicht aus, dafür müssen Unternehmen in allen vier Potenzialdimensionen weitere Aktivitäten bemühen und diese im Sinne der Circular Economy zusammenführen.

Die innerste Sphäre – "Harvesting the ecological & economical reward"

Erst ein Umdenken und eine radikale Veränderung des unternehmerischen Handels hin zur Circular Economy führen zum Maximum des ökologischen und ökonomischen Nutzens im innersten Bereich. Der Hebel dafür ist die aktive und wertsteigernde Verlängerung von Kreisläufen durch *Remanufacturing* und das *Upgraden* von Produkten während der Nutzungsphase. Dabei werden sowohl die Kreisläufe von Produkten als auch von

Modulen und Produktbestandteilen betrachtete. Somit wird eine ressourcenausschöpfende Wertsteigerung über die Lebenszyklen realisiert und damit eine größere ökologische Nachhaltigkeit erreichbar. Außerdem erhöht sich das ökonomische Potenzial durch die Möglichkeit der kontinuierlichen Monetarisierung der Upgrade-Potenziale in den jeweiligen Produkt- und Modulkreisläufen. Erforderlich ist dafür jedoch die Entwicklung neuer Technologien sowohl auf Ebene von Produkt und Produktion als auch in den neuen Bereichen, die das Wirtschaften in Kreisläufen (bspw. Recyclingtechnologien aber auch Digitaltechnologien) erst ermöglichen.

Durch die Beschreibung der vier Potenzialdimensionen sowie der drei Sphären kann die Trajektorie der Nachhaltigkeitstransformation beschrieben werden. Diese steuert unvermeidbar auf den grünen Nordstern und die Circular Economy zu und schneidet die vier Potenzialdimensionen dabei mehrfach. Dadurch werden die Schwerpunkte der Zirkularitätsaktivitäten in den drei Durchläufen je Potenzialdimension definiert, diese sind in Abbildung 2 nochmals zusammengefasst.

	Äußerste Sphäre *„Reducing the ecological impact“*	**Mittlere Sphäre** *“Managing products in lifetime-extending cycles”*	**Innerste Sphäre** *“Harvesting the ecological & economical yields”*
	Fokus auf *Recycling*, geringen Energieverbrauch und weniger umweltschädliche Rohstoffe	Verlängerte Lebensdauer durch *Re-Use* und *Refurbishment*	Verlängerte *Re-X*-Kreisläufe durch *Remanufacturing*
MODULARITÄTS-POTENZIAL	Ressourcenschonung und Effizienzsteigerung durch Komplexitätsreduktion	Modulaustausch im Lebenszyklus zur Lebensdauerverlängerung	Wertsteigerung während des verlängerten Lebenszyklus auf Produkt- und Modulebene
TECHNOLOGIE-POTENZIAL	Optimierung bestehender Technologien	Weiterentwicklung bestehender Technologien	Entwicklung neuer Technologien
WERTSCHÖPFUNGS-POTENZIAL	Ressourcenschonende Wertschaffung	Ressourcenoptimierte Wertschaffung & -erhaltung	Ressourcenausschöpfende Wertsteigerung
ERTRAGS-POTENZIAL	Begrenzte Einsparungs- und Umsatzsteigerungs-möglichkeiten	Diskrete Monetarisierung der Arbitragepotenziale zwischen degradierenden Produktleben	Kontinuierliche Monetarisierung der Upgrade-Potenziale in Produktkreisläufen

Abbildung 2: Die beschreibenden Charakteristika der Sphären

Die aktuelle Herausforderung für Unternehmen besteht demnach darin, sich in den Transformationsbestreben nicht allein auf die ersten Zirkularitätsaktivitäten zu fokussieren. Unternehmen vernachlässigen zurzeit noch, dass sie schon heute in die Aktivitäten, welche auf dem weiteren Weg zur Circular Economy erforderlich sind, investieren müssen, um zu verhindern, dass ihr Geschäft in Zukunft disruptiert wird. Denn Unternehmen müssen ausgehend vom Zielbild des grünen Nordsterns ihre ganzheitlichen Nachhaltigkeitspotenziale verstehen und das strategische Programm für die vier Potenzialdimensionen synergetisch aufbauen. Nur so lassen sich, Entwicklungschancen ausgeglichen realisieren, ohne die gegenwärtige Leistung zu vernachlässigen.

Praxisbeispiel Webasto SE

Playground Green Mechanism – kreatives Set-Up für nachhaltige Produktlösungen

Webasto gehört zu den 100 größten Zulieferern der Automobilindustrie und ist auf die Entwicklung und Herstellung von Dach- und Thermosystemen sowie Batterie- und Ladelösungen für die Elektromobilität spezialisiert.

Vor dem Hintergrund ambitionierter Klimaziele beschäftigt sich Webasto bereits heut damit, wie künftige Generationen seiner Produkte nachhaltiger werden können. Das Projekt „Playground Green Mechanism“ bietet Entwicklungsteams eine Umgebung, sozusagen eine „grüne Wiese“ auf der sie losgelöst von allen Anforderungen – unter eigenen Prämissen entwickeln können: Ihre Zielvorgabe ist bei einem über den gesamten Lebenszyklus um 50 Prozent reduzierten Energieverbrauchs die Funktionalität des Produkts zu gewährleisten – ein sogenanntes „Minimum Viable Sustainable Product“ (MVSP). Erste Ergebnisse dieses wenig restriktiven Umfelds zeugen von Enthusiasmus und hoher Kreativität in den Teams auf einem völlig neuen Niveau.

Die Erfahrungen von Webasto zeigen, dass das Auflösen von Restriktionen und Anforderungen die Kreativität der Entwicklungsteams fördert. So konnte ein MVSP beispielsweise dadurch erreicht werden, dass Peak-Anforderungen, die seit Generationen für die Produkte aus der modularen Dachsystemarchitektur gelten, hinterfragt wurden. Als konkretes Beispiel sei hier die Anforderung genannt, dass das Schiebedach bei einer Fahrgeschwindigkeit von 320km/h und Gegenwind noch schließen können muss.

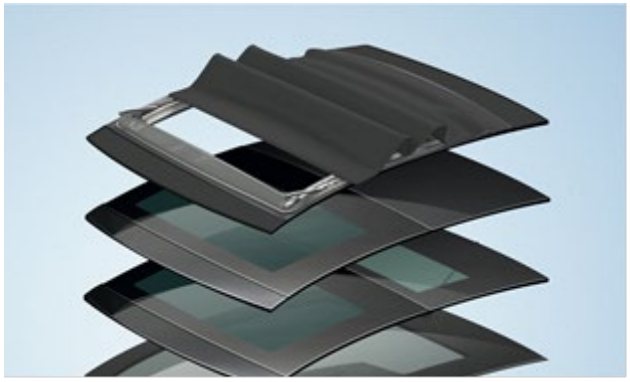


Abbildung 3: Entwicklung von Dachsystemen nach dem "Minimum viable sustainable product" Ansatz bei Webasto

Mit Hilfe dieses Projektes arbeitet Webasto heute also schon auf den grünen Nordstern zu. Auch, wenn das MVSP heute noch höhere Kosten verursacht als das Bestandsprodukt und somit aktuell noch nicht wirtschaftlich ist, wird der Wendepunkt kommen, ab welchem steigende Energiepreise dafür sorgen, dass die energieschonendere Version wirtschaftlicher wird, wodurch schließlich ökologische und ökonomische Potenziale realisiert werden können.

1.3 Paradigmenwechsel der Produktmodularisierung und Technologieplanung

Es drängt sich an dieser Stelle die Frage auf, welche Maßnahmen ergriffen werden können, um das Unternehmen und die eigenen Produkte auf eine Circular Economy und den beschriebenen Wandel vorzubereiten. Um sich heute schon mit den erforderlichen Akti-

vitäten der inneren Sphären auseinander zu setzen, ist es erforderlich die Produktarchitekturen der Produkte bereits jetzt auf die Circular Economy vorzubereiten. Die Produktarchitektur muss dabei so gestaltet sein, dass einzelne Produktumfänge getauscht, aufbereitet oder aufgewertet werden können. Hierzu ist es wichtig, an der richtigen Stelle Flexibilität vorzusehen und diese durch geeignete Schnittstellen zu realisieren. Der Schlüssel zur erforderlichen Transformation liegt dementsprechend in der Produktmodularisierung zur Realisierung kreislauffähiger Produktarchitekturen und der Technologieplanung zur Antizipation der benötigten Flexibilität und benötigter Upgrades.

Nach Definition beschreibt die Modularisierung die geeignete Gliederung eines Produktes, indem die Abhängigkeiten zwischen den Elementen (Modulen) verringert bzw. die Schnittstellenvarianten reduziert werden [8]. Das Ziel ist demnach, standardisierte Schnittstellen zwischen Modulen vorzusehen, sodass verschiedenste Modulvarianten miteinander kombiniert werden können und eine große Anzahl verschiedener Produktvarianten für den Kunden bei gleichzeitig hoher Modulwiederverwendung realisiert werden können. Die Module haben dabei keine oder nur minimale Abhängigkeiten untereinander, um sicherzustellen, dass die Änderung eines Moduls keine Auswirkungen auf andere Module hat.

Doch während sich die Produktmodularisierung in der Vergangenheit auf die Realisierung von Skaleneffekten fokussierte, dient Sie für künftige Produkte als der zentrale Befähiger für die Realisierung der Kreislaufwirtschaft. Die Modularisierung steht somit vor einem Paradigmenwechsel, der entlang der oben beschriebenen Trajektorie von der heutigen linearen Wirtschaft zur Circular Economy beschrieben werden kann. Dabei verändern sich insbesondere die Zielstellung (1), die Art und Weise Kundennutzen zu schaffen (2) und die Komplexität der Anforderungen an die Modularisierung (3).

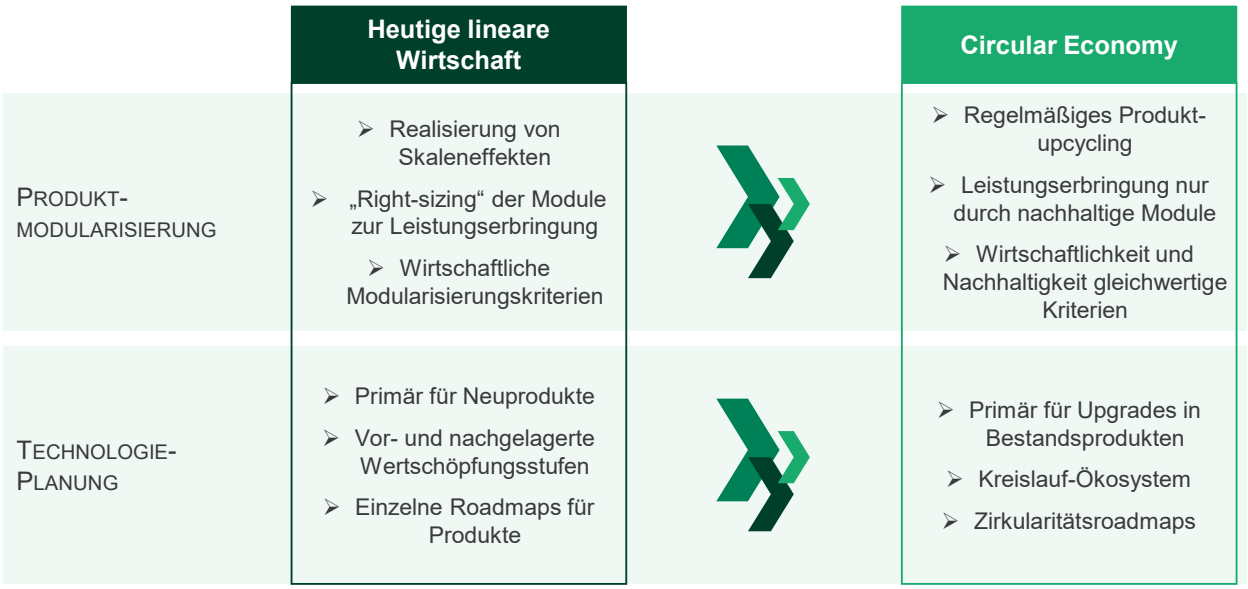


Abbildung 4: Paradigmenwechsel der Produktmodularisierung und Technologieplanung

1. Die Veränderung in der Zielstellung von Modularisierung beginnt mit der Ergänzung von Zieldimensionen. Zu Beginn liegt der Fokus auf der Realisierung von Skaleneffekten, wobei im Produktportfolio möglichst viele Wiederholteile verwendet werden sollen. Modulare Produkte ermöglichen es, die Komplexität im Unternehmen zu reduzieren, die Auftragsabwicklung zu vereinfachen (z.B. durch Konfiguratoren) und Produktionsprozesse zu standardisieren. Diese Effekte zielen in

erster Linie auf eine Effizienzsteigerung ab und bieten somit auch ökologisches Potenzial– sie dürfen jedoch nicht zu einer vermeintlich wirtschaftlich sinnvollen Überproduktion führen [9]. Eine zunehmend wichtigere Zieldimension der Modularisierung ist die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten. Dies wird möglich, indem Module entsprechend ihrer erwarteten, mehrwertstiftenden Lebensdauer klassifiziert werden und Module deren Mehrwert eine kürzere Lebensdauer als das Gesamtprodukt selbst aufweisen (z.B. Verschleißteile oder Komponenten mit einer hohen Frequenz technischer Innovationen) so gestaltet werden, dass sie im Laufe des Produktlebens aufwandsarm ausgetauscht werden können. Darüber hinaus wird die Modularisierung es ermöglichen, Produkte regelmäßig „upcyclen" zu können, also durch die Erneuerung von Modulen den Wert des Produktes steigern zu können. Die ausgetauschten vermeidlich „alten" Module werden dann durch „Re-Use"-Ansätze in Produkten niedrigerer Preissegmente wiederverwendet oder erfahren durch Remanufacturing selbst ein „upcycling" und können in vergleichbaren Produkten erneut eingesetzt werden.

2. Auch die Wahrnehmung des Kundennutzens modularer Produkte wird sich weiterentwickeln. Ein Produkt wird gekauft, weil sich die Kund:innen von den Eigenschaften und Funktionen einen Wert bzw. einen Nutzen versprechen [10]. Dabei geht es häufig darum, ein Kundenproblem zu lösen und die entsprechenden Bedürfnisse zu erfüllen. Der Nutzen entsteht für Kund:innen zunächst dadurch, dass die Produkte die benötigten Eigenschaften und Funktionen möglichst kostengünstig bereitstellen können. Passen die angebotenen Produkte möglichst gut zu den Bedürfnissen des Kunden entsteht an dieser Stelle eine Möglichkeit die Ressourceneffizienz zu steigern, indem Produkte nicht überdimensioniert sind und ihr Nutzungs- und Auslastungsgrad verbessert wird. Auf dem Weg zur Circular Economy reicht ein reines „right-sizing" der Produkte nicht mehr aus und die ressourcenschonende Leistungserbringung rückt stärker in den Fokus. Die richtige Maßnahme in diesem Kontext ist die Steigerung der Leistungserbringung des Produktes ohne zusätzlichen Ressourcenaufwand. Dies kann erreicht werden, indem Softwareanpassungen oder zusätzliche Dienstleistungen zur Leistungssteigerung von Produkten genutzt werden. Die Implikation für die Modularisierung ist eine steigende Relevanz von Software und Dienstleistungen, die in künftigen Produktarchitekturen berücksichtigt werden müssen. Im Kern der Circular Economy wird der Wert eines Produktes wird nicht länger nur in Kosten, Produktivität oder Leistungsspezifikationen gemessen, vielmehr ist es ein Zusammenspiel von weiteren nachhaltigkeitsorientierten Faktoren. Diese messen im Sinne der ESG-Faktoren (Ecological, Social, Governance) die Auswirkungen des Produktes auf seine Umwelt und fließen in die Bewertung des Produktwertes mit ein. Die Module des Produktes müssen dementsprechend so gestaltet sein, dass sie in ihrer initialen Entstehung diese Faktoren bereits bestmöglich adressieren. Außerdem müssen bereits bei der Entwicklung der Module mögliche zweite, dritte oder x-te Zyklen in der Kreislaufwirtschaft, ebenso wie die Möglichkeit zum Refurbishment, Remanufacturing oder weiteren Re-X-Strategien, berücksichtigt werden.
3. Vor dem Hintergrund der bereits aufgezeigten Veränderungen wird das Aufteilen des Produktes in Module eine vielfach komplexere Aufgabe als heute, da weitere Freiheitsgrade und Zielgrößen hinzukommen. Gestern erfolgte eine Modularisierung auf Basis einer Optimierung der Modulvariantenvielfalt, wobei versucht wurde das Produkt so in Module aufzuteilen, dass aufwändige und teure Module möglichst wenig Varianten benötigten, um das gesamte Produktportfolio bedienen zu

können, während die Diversifizierung des Produktes über einfachere und kostengünstigere Module erfolgte. Im Fokus stand also stets die Fokussierung auf die Erfüllung von individuellen Kundenanforderungen bei gleichzeitiger Standardisierung von Produktkomponenten zur Realisierung von Skaleneffekten in Produktion und nachgelagerten Prozessen. Im Zuge der Kreislaufwirtschaft müssen heute und in Zukunft weitere Dimensionen bei der Festlegung von Modulen und Modulgrenzen beachtet werden. Beispielsweise ist es sinnvoll Komponenten mit ähnlicher Lebenserwartung zu einem Modul zusammenzufassen, da die Lebensdauer eines gesamten Moduls von der Lebensdauer der kurzlebigsten Komponente abhängig ist. Eine andere Perspektive wäre die Materialsicht, um die Module am Ende ihrer Lebenszyklen einem Recycling-Prozess zuführen zu können. Die Module so zu definieren, dass sie Refurbishment oder Remanufacturing durch einfache Demontage, Aufbereitung und Upgradefähigkeit unterstützen wäre eine weitere Zielstellung für die modularen Produktarchitekturen künftiger Produkte. Diese Beispiele zeigen bereits, wie viele Perspektiven es auf die Modularisierung für die Circular Economy geben wird und sorgen somit für die eingangs beschriebene Komplexitätssteigerung in der Moduldefinition. Um sich dieser Komplexität anzunehmen, müssen neue Methoden und Tools entwickelt werden, die bei der Produktarchitekturentwicklung für modulare, kreislauffähige Produkte unterstützen.

Die Grundlage der Realisierung dieses Wandels in der Produktmodularisierung ist, dass die zweckdienlichen Entscheidungen im Hinblick auf die zukünftige technologische Ausrichtung getroffen werden und deren Operationalisierung vorausgedacht wird.

Aufgabe der Technologieplanung ist die Beantwortung der Fragen, mit welchen Technologien und auf welchem Wege die Kundenanforderungen besser erfüllt, die ökologischen und ökonomischen Unternehmenspotenziale gestärkt, Wettbewerbs-vorteile und Zeitvorsprünge erzielt und Stärken ausgebaut bzw. die Schwächen abgebaut werden können [11].

Damit geht einher, dass auch die Ausrichtung der Technologieplanung sich über die Entwicklung hin zur Circular Economy transformiert. Dieser Paradigmenwechsel umfasst insbesondere drei Aspekte: 1. die Zeitpunkte im Produktlebenszyklus, für welche der Technologieeinsatz vorausgedacht werden muss, 2. der Umfang der Produktlebenszyklen, welcher in der Planung Berücksichtigung findet, sowie 3. die Interdependenz zwischen den verschiedenen Roadmaps.

1. Produzierende Unternehmen fokussieren bei ihrer technologischen Ausrichtung fast ausschließlich die zukünftig zu fertigenden Produkte. Dies resultiert aus den heutigen Geschäftsmodellen produzierender Unternehmen, welche auf die einmalige Transaktion eines hergestellten Produktes ausgerichtet sind. Sobald bspw. mittels Refurbishment und Re-Use die Lebensdauern von Produkten verlängert werden und produzierende Unternehmen mehrmals mit den von ihnen hergestellten Produkten zur Werterhaltung in Berührung kommen, müssen die technologischen Entscheidungen daran angepasst werden. Da die Gesamtlebensdauer von Produkten zunehmen wird und ihre modulare Gestaltung den Austausch von Baugruppen und Komponenten erlaubt, werden Technologien in bestehende Produkte im Markt integrierbar sein müssen. Zukünftige Technologien wirken sich dann nicht mehr nur auf zukünftig herzustellende Produkte aus. In der Circular Economy wird durch die regelmäßigen Produktupgrades ein Großteil der Wertschöpfung in Produkten nach ihrer erstmaligen Herstellung erfolgen. Die Neuproduktion, wie sie

heute der Standard ist, wird anteilig zurückgehen und dementsprechend die Technologieplanung primär für Bestandsprodukte erfolgen.

2. Unternehmen fokussieren derzeit die von ihnen eingesetzten Technologien zur (ressourcenschonenden) Wertschaffung sowie Technologien in vor- oder nachgelagerten Wertschöpfungsstufen aufgrund möglicher (in)direkter Abhängigkeiten. Aufgrund erster geschlossener Produktkreisläufe und schließlich ineinandergreifender Kreisläufe bei der Transformation zur Circular Economy entwickelt sich dies hin zu einer systemischen Technologiebetrachtung in diesen Kreislauf-Ökosystemen unter Berücksichtigung der Schnittstellen zu tangierenden bzw. überschneidenden Kreisläufen. Damit steigt zum einen der Umfang der Planung um zusätzliche relevante Technologieebenen und zum anderen müssen Technologieentscheidungen nicht mehr nur als positiv für das eigene Unternehmen beurteilt werden, damit sie die Wettbewerbsfähigkeit steigern, sondern darüber hinaus auch im Gesamtsystem durchsetzungsfähig und daher positiv für alle daran partizipierenden Stakeholder sein.
3. Der letzte Paradigmenwechsel in der Technologieplanung adressiert den Wandel von klassischen Technologie-Roadmaps für einzelne Produkte bzw. Produktfamilien hin zu Zirkularität-Roadmaps. Während heute die Technologieeinsätze in Produkten noch deterministisch aufgezeigt werden, greifen die Roadmaps in Zukunft die möglichen kaskadierenden Produktleben auf und stellen Bedingungen und Effekte der Kaskadierung in Bezug auf die einzusetzenden Technologien dar. Dies entwickelt sich schließlich zu der Zeichnung von Technologieeinsatz-Routen unter Berücksichtigung möglicher Entwicklungsszenarien, die den Technologieeinsatz in den verschiedenen Produkten und Modulen über mehrere Lebenszyklen und damit auch über verschiedene mögliche Kreisläufe abbilden.

Zur Realisierung kreislauffähiger Produkte müssen daher die Produktmodularisierung und Technologieplanung verstärkt integriert werden. Durch eine iterative Synchronisation zwischen Produkt- und Technologieebene gelingt so eine ökologisch und ökonomisch effektive Abstimmung der Lebenszyklen verschiedener Modulgenerationen über diverse Produktgruppen und Stakeholder in ineinandergreifenden Kreisläufen.

Praxisbeispiel Endress+Hauser AG

Die Endress+Hauser AG ist ein weltweit führender Anbieter von Messgeräten, Dienstleistungen und Lösungen für die industrielle Verfahrenstechnik.
Ihre Kund:innen arbeiten in den unterschiedlichsten Branchen, wie beispielsweise Chemie, Lebensmittel, Öl und Gas, Wasser und Abwasser, Energie und Kraftwerke, Metalle und Bergbau, sowie Life Sciences, geprägt durch Anlagen mit hoher Komplexität, harschen Bedingungen und langer Lebensdauer von oft bis zu 50 Jahren.
Diese Anlagen unterliegen während ihrer langen Lebensdauer einem stetigen inneren Wandel. Durch den erforderlichen Austausch von Teilsystemen, (Software-)Updates und Upgrades von Komponenten sowie das Hinzufügen weiterer Datenaufnahme -und Datenverarbeitungssysteme nimmt die Komplexität dieser Systeme exponentiell zu. Die Circular Economy führt mit zunehmend geschlossenen und interdependenten Kreisläufen von Produkten und Komponenten in diesen Systemen zu einer weiteren Erhöhung dieser Komplexität.
Endress+Hauser hat daher frühzeitig festgestellt, dass sie, die Anwendungsgebiete ihrer Lösungen als „System-of-Systems“ denken müssen, um langfristig ökologisch und öko-

nomisch wettbewerbsfähig zu bleiben. Dabei wird den Unsicherheiten über die Technologieentwicklung, dem Nutzerverhalten und den Lösungen weiterer Anbieter dadurch Rechnung getragen, dass ihre Lösungen als robuste und resiliente Teilsysteme ausgestaltet sind. Dies resultiert in zwei konkrete Anforderungen an die Produktarchitektur: Jede ihrer Lösungen, als Komponente eines Gesamtsystems, ist erstens als funktional abgeschlossenes Teilsystem auszugestalten und zweitens müssen die Schnittstellen zu anderen Systemen standardisiert, physisch und softwareseitig robust und über lange Zeit kompatibel ausgelegt sein. Letzteres erfordert zum Beispiel als Technologie einen hohen Grad von automatisierten Tests in der Entwicklung, um die Qualität bei stetig zunehmender Kombinationsvielfalt sicherzustellen. Dieser Umstand wurde früh erkannt und in der Technologieplanung entsprechend berücksichtigt.
Wie sich dies in ihren Lösungen ausprägt, wird insbesondere am Beispiel der bereits seit Jahren etablierten Sensor-Technologie Memosens bzw. nun Memosens 2.0 deutlich: Digitale Sensoren mit Memosens-Technologie speichern Kalibrier-, Sensor- und Prozessdaten direkt im Sensor. Dadurch lassen sie sich unter optimalen Bedingungen im Labor kalibrieren und regenerieren. Durch regelmäßigen Austausch, Refurbishment und Kalibrierung können Memosens-Sensoren bis zu 30% länger leben – selbst unter den harten Anwendungsbedingungen der verfahrenstechnischen Industrie. Der Bajonettverschluss und die automatische Sensorerkennung ermöglichen einen „Plug & Play" Austausch vorkalibrierter Sensoren im Feld in kürzeste Zeit. Dies reduziert die benötigte Zeit für die Wartung und damit die Stillstandskosten der Anlage.
Memosens 2.0-Sensoren können ebenfalls in das IIoT-Ökosystem Netilion von Endress+ Hauser integriert werden. Dort können die Sensor- und Diagnosedaten mithilfe verschiedener Anwendungen ausgewertet werden, was neben Informationen zur Prozessoptimierung auch präzise Voraussagen über den Zustand der Sensorik und über etwaigen Wartungsbedarf zulässt.
Derweil ist die neue Memosens-Generation vollständig rückwärtskompatibel, sodass Anlagenbetreiber nicht dazu gezwungen sind, existierende Messlinien durch neue zu ersetzen: Neue Sensoren mit erhöhtem Funktionsumfang können ohne Einschränkungen mit bereits verbauten Transmittern der älteren Generation verwendet werden. Die Kompatibilität der Komponenten erlaubt zudem jederzeit Erweiterungen und Änderungen der Konfiguration. Dies bewahrt die getätigten Investitionen der Vergangenheit.

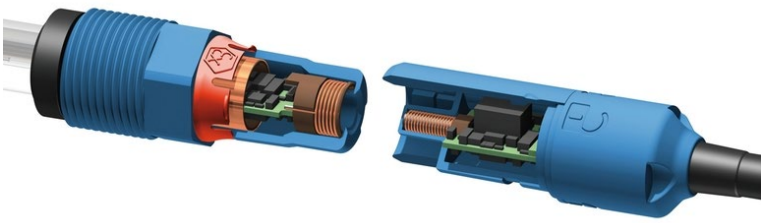


Abbildung 5: Sensortechnologie Memosens 2.0 - für eine einfache, sichere und vernetzte Flüssigkeitsanalyse

2 Realisierung kreislauffähiger Produkte

Für die Entwicklung modularer und kreislauffähiger Produkte finden sich entlang der drei Phasen Analysieren, Bewerten und Realisieren vier Aufgaben, die zur Umsetzung der Paradigmenwechsel in Produktmodularisierung und Technologieplanung benötigt werden. Um heute und morgen ökologisch und ökonomisch nachhaltige Leistungen anzubieten, bedarf es eines Verständnisses darüber, welche Veränderungen der Wandel zu einer Circular Economy in Märkten und bei Kund:innen mit sich bringt. Außerdem erfordert das regelmäßige Upgraden von Produkten das Antizipieren von relevanten Technologiesprüngen. Unter Berücksichtigung dieser beiden Perspektiven gilt es eine Produktarchitektur für kreislauffähige Produkte zu entwickeln, welche die erweiterten Zielgrößen und Freiheitsgrade berücksichtigt und dessen Realisierung die vertikale (um Re-X-Technologien) sowie horizontale (um Remanufacturing und Modul-Upgrades) Erweiterung der Technologiebetrachtung erfordert. Abbildung 6 illustriert die drei Phasen und vier Gestaltungsaufgaben zur Entwicklung modularer kreislauffähiger Produkte.

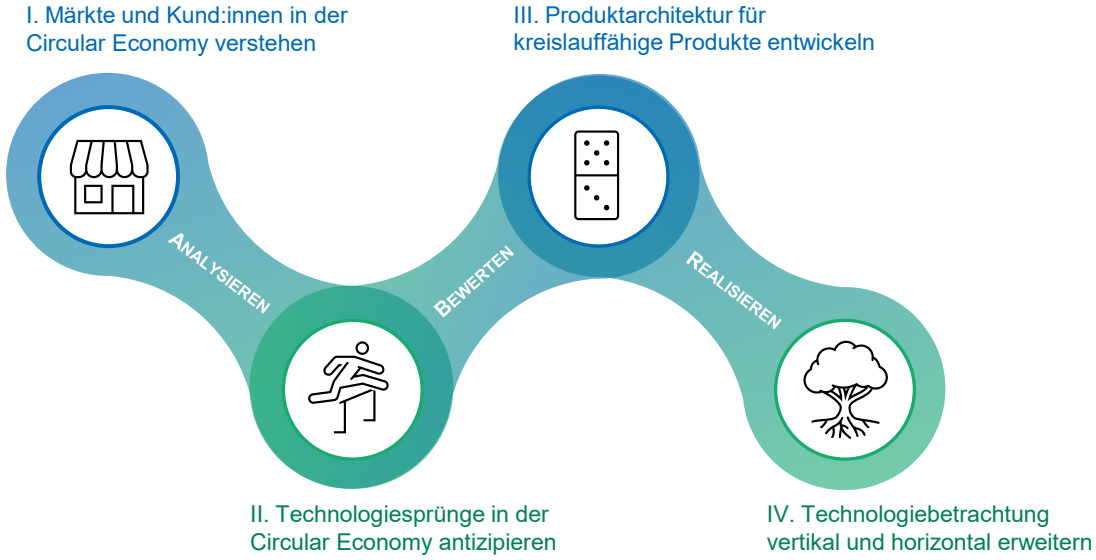


Abbildung 6: Entwicklung modularer kreislauffähiger Produkte

2.1 Märkte und Kund:innen in der Circular Economy verstehen

Zunächst muss durch ein tiefergreifendes Verständnis von Märkten und Kunden in der Circular Economy der Grundstein für ein erfolgreiches modulares und kreislauffähiges Produkt gelegt werden. Dabei gilt es einerseits stärker als zuvor die Veränderungen von Kundenbedürfnissen über der Zeit zu analysieren und andererseits potenzielle Marktsegmente für Re-X-Produkte zu identifizieren. Eine zentrale Rolle nimmt auch die Betrachtung der Rohstoffmärkte im Kontext der Circular Economy ein. Die Verfügbarkeit und die Preise der Rohstoffe werden einen zunehmend großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Re-X-Modulen oder Produkten einnehmen.

Praxisbeispiel Markt für Halbzeug Glas

Bei der Herstellung von Schiebedächern für die Automobilindustrie benötigt Webasto als Glas als Halbzeug. Glas hat den Vorteil, dass es beliebig oft wiederverwendet werden kann. Das Recycling von Glas besitzt darüber hinaus den Vorteil hat, dass es einen niedrigeren Schmelzpunkt als seine Rohmaterialien hat und somit Recycling-Glas theoretisch

mit geringerem Energiebedarf hergestellt werden kann. Allerdings ist die Verfügbarkeit von Recycling-Glas nicht ausreichend, um den weltweiten Glasbedarf zu decken. Das liegt vor allem an der langen Nutzungsdauer von Glas in Anwendungen wie z.B. dem Gebäudebau, wodurch zu wenig Glas zurückgeführt wird.

In Deutschland wurden 2021 7,78 Mio. Tonnen Glas hergestellt [12], wovon ca. 7,6% (also 590.000 Tonnen) für die Automobilindustrie genutzt wurden [13]. Im Gegensatz dazu standen aus zu verwertenden Altfahrzeugen aber nur ca. 14.300 Tonnen Glas zur Rückgewinnung zur Verfügung, wovon letztlich nur ca. 998 Tonnen zurückgewonnen wurden [14].

Dieses Beispiel zeigt, dass selbst bei Vorhandensein der technologischen Voraussetzungen die Verfügbarkeit ein weiteres wichtiges Kriterium ist und die Kenntnis über die relevanten Rohstoff- und Halbzeugmärkte von hoher Relevanz sind.

Neben den Rohstoff- und Halbzeugmärkten spielen aber natürlich auch die Absatzmärkte und dementsprechend die Kund:innen eine wichtige Rolle. Bestehende Methoden sind insofern anzupassen, dass sie eine größere Gewichtung auf langfristige Prognosen legen und iterativ angewandt werden müssen. Mittels einer Marktsegmentierung mit Marktsegmenten homogener Kundenbedürfnisse kann analysiert werden, wie sich Kundenbedürfnisse innerhalb dieser Marktsegmente im Laufe der Zeit verändern könnten. Für unterschiedliche Zeitfenster eignen sich dazu andere Methoden:

1. *Aktuelle Bedürfnisse (z.B. Conjoint-Analysen, Verkaufszahlenanalysen, …)*
2. Kurzfristigen Prognosen von Bedürfnissen *(z.B. Datenextrapolation, Trendradare, …)*
3. Langfristigen Prognosen von Bedürfnissen *(z.B. Szenario-Technik, Simulationen, …)*

Markt- und Kundenanalysen werden untersuchen müssen, in welchen Marktsegmenten Potenzial für Re-X-Produkte bzw. Produkte mit Re-X-Modulen besteht. Dies unterstützt, die Wiederverwendung von Produkten und Modulen im zweiten, dritten oder x-ten Lebenszyklus vorzudenken.

Für die Circular Economy muss dementsprechend bei der Analyse von Märkten und Kunden eine große Menge an Informationen aufgenommen und strukturiert werden. Erst wenn alle Einzelinformationen miteinander vernetzt und kontextualisiert sind, entsteht ein zuverlässiges Gesamtbild möglicher künftiger Szenarien. Zur Unterstützung bei der Handhabung dieser Fülle an Informationen und bei der Vernetzung dieser hilft der Aufbau einer Market Intelligence [15].

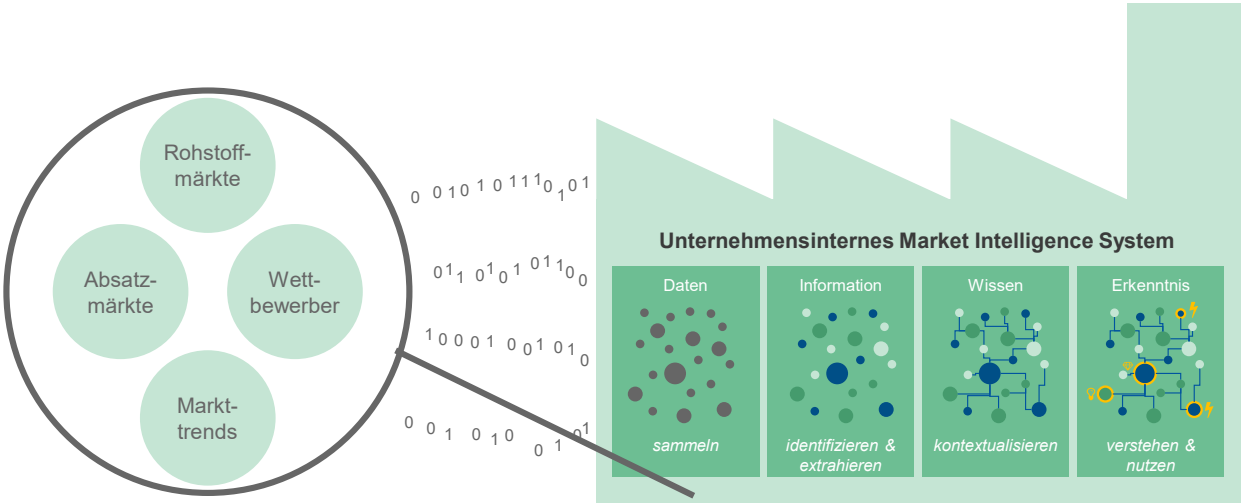


Abbildung 7: Market Intelligence zur Aufnahme und Auswertung von Marktinformationen

2.2 Technologiesprünge in der Circular Economy antizipieren

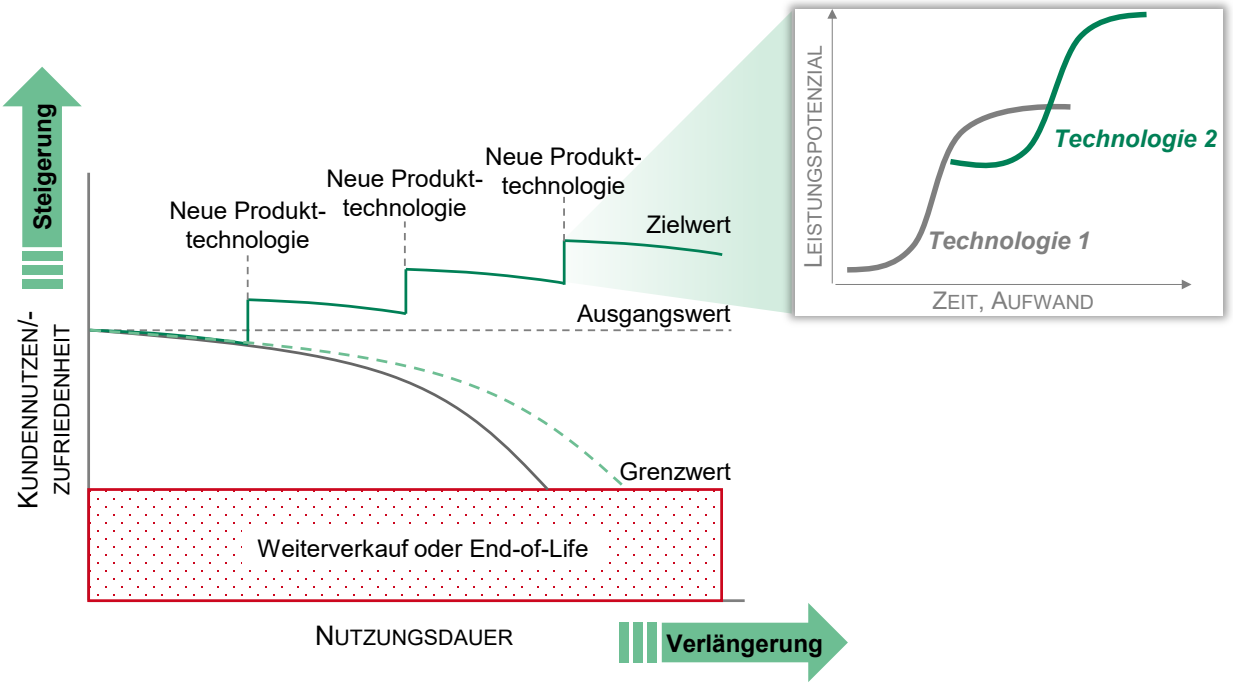


Abbildung 8: Wertsteigerung während der Nutzungsdauer durch die Einbringung neuer Produkttechnologien

Zur Realisierung längerer Lebenszyklen und der in der Circular Economy angestrebten Wertsteigerung innerhalb der Nutzungsphase von Produkten muss sichergestellt werden, dass neue Funktionalitäten und deren zugrundeliegenden Technologien sowohl nach der Erstproduktion als auch während oder zwischen zwei Nutzungszyklen in das Produkt eingebracht werden können.

Dafür müssen zum einen relevante Technologiesprünge antizipiert werden. Zum anderen ist es erforderlich, dass bei der Produktmodularisierung die Aufwärtskompatibilität der entsprechenden Module sichergestellt wird.

Eine erfolgreiche Antizipation von Technologiesprüngen in der Circular Economy ist aufgrund des stark vernetzten Charakters eines zirkulären Wertschöpfungsnetzwerks nur möglich, wenn eine ganzheitliche Betrachtung der Systemwirkung des potenziellen Technologiesprungs im unternehmerischen Umfeld durchgeführt wird. Das Maß, welches Aufschluss über das Eintreten und das Ausmaß eines Technologiesprungs gibt, ist das Disruptionspotenzial. Dieses fasst Eintrittswahrscheinlichkeit, Eintrittsgeschwindigkeit sowie Wirkungsausmaß zusammen und lässt sich mittels einer Systemwirkungsanalyse im Zirkularität-Ökosystems bestimmen. Im Rahmen dieser Systemwirkungsanalyse werden die Auswirkungen des potenziellen Technologiesprungs entlang von drei Dimensionen untersucht: Stakeholder im Kreislauf-Ökosystem, Produktlebenszyklus für den Technologieeinsatz sowie Einflussfaktoren, welche das Entstehen, die Entwicklung bzw. die Eintrittsgeschwindigkeit eines Technologiesprungs beeinflussen.

Die relevanten Stakeholder sind alle Akteure, die an der Umsetzung des Technologiesprungs beteiligt sind, diesen anwenden oder in ihrem Handeln durch eben diesen beeinflusst sind. Somit stellen Nutzer, Hersteller (einschließlich Wettbewerber), Verwerter, Recycler, Lieferanten und Komplementoren allgemein die relevanten Stakeholder im Wertschöpfungsnetzwerk dar. Der Staat, Kapitalgeber und die Öffentlichkeit werden aufgrund ihrer nicht direkt-wertbeeinflussenden Rolle unter der Dimension „Einflussfaktoren“ berücksichtigt. Als zweite Dimension werden für jeden identifizierten Stakeholder im zirkulären Ökosystem die entsprechenden Phasen im Produktlebenszyklus, beziehungsweise in den aufeinanderfolgenden Lebenszyklen, aufgelistet.

Um zu untersuchen, ob, und mit welcher Geschwindigkeit und welchem Ausmaß sich ein Technologiesprung voraussichtlich durchsetzen wird, müssen zusätzlich Faktoren berücksichtigt werden, welche die Entstehung und Etablierung eines Technologiesprungs über die einzelnen Produktlebenszyklusphasen sowie Stakeholder im Wertschöpfungsnetzwerk hinweg beeinflussen können. Neben politisch-rechtlichen Einflussfaktoren, sind makroökonomische, mikroökonomische (Nutzen-Aufwand-Verhältnis auf jeweiliger Stakeholder-Ebene), sozio-ökonomische sowie technologische Faktoren zu berücksichtigen. Ein positive Wirkausprägung weist einen förderlichen Einfluss auf einen Technologiesprung auf und kann als Treiber verstanden werden. Im Umkehrschluss stellt eine negative Wirkausprägung ein potenzielles Hemmnis dar.

Das Zielbild der Systemwirkungsanalyse stellt eine sogenannte *Disruption Heat Map* dar (siehe Abbildung 9). Diese bietet die Möglichkeit, die Systemreife des Technologiesprungs zu bemessen, kritische Eintrittsbarrieren zu identifizieren und die Veränderungen der Wertschöpfungen vorauszudenken. Diese kombinierte Betrachtung lässt somit auf das Disruptionspotenzial des Technologiesprungs schließen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit zeigt sich in der Heat Map anhand der farblich kodierten Wirkausprägungen für die verschiedenen Stakeholder über die verschiedenen Produktlebenszyklen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist am höchsten, wenn die Wirkausprägungen in allen Produktlebenszyklusphasen als hoch eingestuft wird und über die unterschiedlichen Stakeholder hinweg synchronisiert sind – dies kann auch als hoher Reifegrad des Kreislauf-Ökosystems bezeichnet werden. Bei einem hohen Reifegrad ist eine hohe Bereitschaft und Fähigkeit zur Realisierung und Etablierung eines Technologiesprungs im System anzunehmen. In diesem Fall ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die neue Technologie dominant wird und die etablierte Technologie verdrängt.

Die Eintrittsgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Hürden zur Etablierung der neuen Technologie sowie dem verbliebenen Potenzial der etablierten Techno-

logie. Das noch verbleibende Potenzial der etablierten Technologie wirkt dem Disruptionspotenzial eines Technologiesprungs entgegen, sodass der relative Potenzialvorteil entscheidend für den Eintritt ist. Der ermittelte Reifegrad des systemischen Kontextes hilft bei der Ermittlung der Eintrittsgeschwindigkeit eines Technologiesprungs, da er Informationen hinsichtlich bestehender Hürden zur Durchsetzung eines Technologiesprungs liefert.

Das Wirkungsausmaß bezieht sich auf die zu erwartenden Veränderungen im Wertschöpfungsnetzwerk bei Eintreten des Technologiesprungs. Diese können beispielsweise auf vertikaler oder horizontaler Ebene stattfinden, indem sich Phasen in dem Produktlebenszyklus verschieben, hinzukommen beziehungsweise entfallen oder Stakeholder zukünftig aufgrund sich verändernder Wertschöpfungsaktivitäten aus dem System fallen oder hinzukommen.

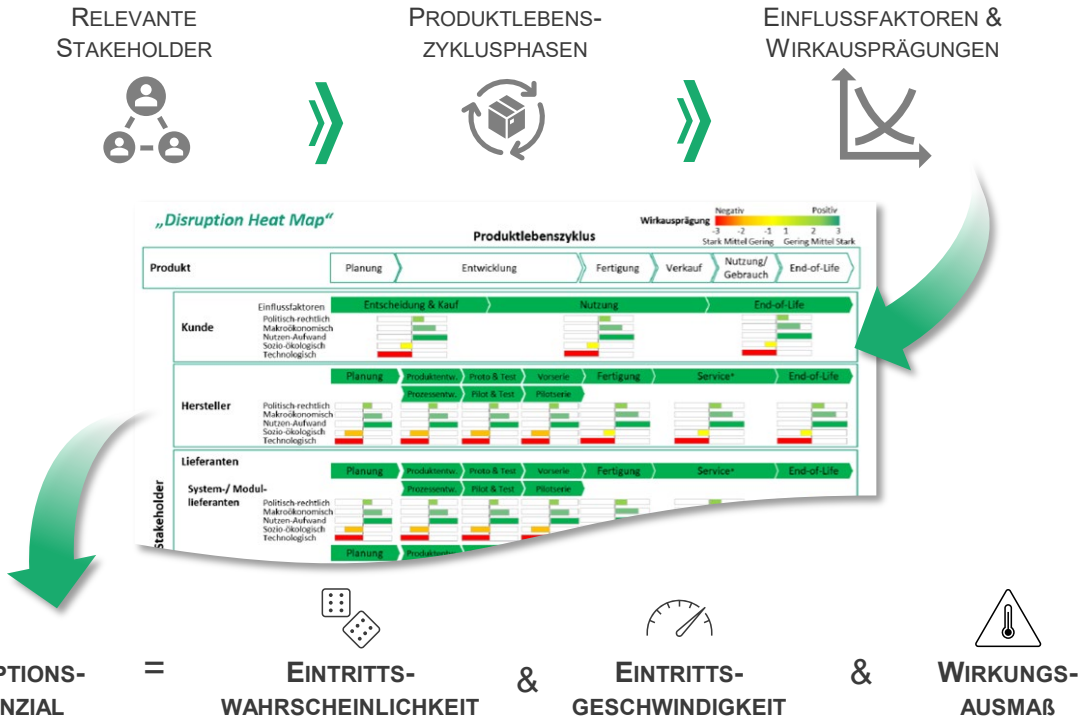


Abbildung 9: Systemwirkungsanalyse zur Bestimmung des Disruptionspotenzials eines Technologiesprungs

Abschließend ist eine qualitativ-quantitative-Vorteilhaftigkeitsbewertung aus Sicht eines jeden betroffenen Unternehmens erforderlich. Ein Technologiesprung kann das Unternehmen bzw. das unternehmensspezifische Umfeld auf zahlreichen Ebenen und in vielfältiger Art beeinflussen. Deshalb ist eine Analyse des strategischen Fits, also der strategischen Anpassungsfähigkeit eines Unternehmens auf Chancen im externen Umfeld, und eine Bewertung des finanziellen Vorteils erforderlich. Nur so ist eine Aussage möglich, ob das Unternehmen in der Lage ist den Technologiesprung mitzutragen und einen ökonomischen Mehrwert daraus zu generieren. Eine systematische Systemwirkungsanalyse ermöglicht Akteuren somit eine frühzeitige Antizipation relevanter Technologiesprünge für das Upgraden und Upcycling von Produkten in der Circular Economy.

2.3 Produktarchitektur für kreislauffähige Produkte entwickeln

Aufbauend auf den vorherigen Schritten kann eine Produktarchitektur für kreislauffähige Produkte entwickelt werden. Bereits zuvor wurde festgehalten, dass die Modularisierung im Zuge der Circular Economy eine wesentlich komplexere Aufgabe wird. Verursacht wird dies durch die erweiterten Zieldimensionen hinsichtlich Lebensdauerverlängerung und Re-X-Fähigkeit sowie durch erweiterte Freiheitsgrade in Form von einer möglichen Leistungserbringung durch Software und Dienstleistungen. Durch die Vielzahl der Interdependenzen und möglichen Einflussparameter wird die Modularisierung zunehmend komplexer, sodass es für die Entwicklungsteams mit konventionellen Methoden nicht möglich ist, die Auswirkungen von Entscheidungen vollständig zu erfassen. Die Modularisierung muss somit durch entsprechende Methoden und Tools unterstützt werden und entwickelt sich zu einem umfangreichen Optimierungsproblem. Dabei müssen neben technischen Restriktionen und Schnittstellen weitere spezifische Perspektiven der Circular Economy berücksichtigt werden, um eine geeignete Produktarchitektur zu erhalten. Auf Grund der Vielzahl möglicher Lösungsalternativen eignet sich als Basis für die Architekturentwicklung ein Systemmodell, wie es aus dem Model-Based Systems Engineering bekannt ist. Das Modell lehnt sich an die bekannte RFLP-Logik (Requirements, Functions, Logic, Product) an [16]. Auf Basis des Inputs aus Schritt 1 werden zunächst die Anforderungen an das Produkt modelliert und anschließend die entsprechenden benötigten Funktionen des Produktes abgeleitet und mit den entsprechenden Anforderungen im Systemmodell verknüpft. Im nächsten Schritt folgt die Verknüpfung der Funktionen mit Produktelementen, die zur Realisierung dieser Funktion in Frage kommen. Die Produktelemente können dabei Komponenten, Baugruppen aber auch Softwareumfänge sein. Häufig können Produktfunktionen auf verschiedene Arten und Weisen realisiert werden, weshalb auch verschiedene Alternativen von Produktelementen zur Realisierung der Funktionen in Frage kommen. Für eine vollständige Gesamtarchitekturgestaltung sollten diese Alternativen der technischen Lösung berücksichtigt werden und im Systemmodell als Alternativen integriert werden. Im letzten Schritt des Aufbaus des Systemmodells werden den verschiedenen Produktelementen Attribute (z.B. Material, erwartete Lebensdauer, Kosten, …) zugewiesen und die technischen Abhängigkeiten von anderen Produktelementen hinterlegt.

Auf dieser Grundlage werden relevante Perspektiven für eine modulare Produktgestaltung in der Circular Economy definiert. Klassischerweise wird bei der Modularisierung in Abteilungen, Gewerken oder Funktionseinheiten gedacht. Die funktionsorientierte Sichtweise wird auch zukünftig berücksichtigt, jedoch ergeben sich weitere Perspektiven hinsichtlich der angestrebten Re-X-Strategie, der Lebensdauer oder der Materialien. Die Re-X-Strategie berücksichtigt, welche strategischen Ziele mit den Komponenten im Kontext der Circular Economy verfolgt werden. Daneben sind weiterhin technische Restriktionen zu berücksichtigen, um technisch sinnvolle Module zu erhalten. Ferner spielt die Lebensdauer der Komponenten für die Modularisierung eine wichtige Rolle, indem Komponenten mit einer ähnlichen Lebensdauer möglicherweise in einem Modul zusammengefasst und als Bündel ausgetauscht werden können. Weitere Perspektiven ergeben sich aus unternehmensindividuellen Anforderungen.

Nachdem alle notwendigen Perspektiven formuliert wurden, erfolgt die Ausdetaillierung der Perspektiven in Kriterien. Für die einzelnen Kriterien wird anschließend eine Bewertung der verschiedenen Produktelemente auf Basis der hinterlegten Attribute vorgenommen. Bei der Definition der Kriterien sollte der Grundgedanke verfolgt werden, dass Produktelemente, die die gleichen Kriterien erfüllen, in einem gemeinsamen Modul verortet werden sollten. Am Beispiel der Perspektive Lebensdauer kann dies verdeutlicht werden: Mögliche Kriterien könnten u. A. lauten: „Verschleißfreiheit“, „erwartete Betriebsdauer“ oder „Frequenz technologischer Innovationen“. Produktelemente, welche durch diese Kriterien auf vergleichbare Weise bewertet werden, sollten aus Sicht dieser Perspektive in einem gemeinsamen Modul verortet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Produktelemente eine ähnliche Lebensdauer erreichen und somit bei einem Austausch des zugehörigen Moduls nur Produktelemente ersetzt werden, die ohnehin kurz vor Ende ihrer Lebensdauer stehen. So kann vermieden werden, dass nur aufgrund einer Einzelkomponente ein Modul, welches ansonsten aus voll einsatzfähigen Komponenten besteht, ersetzt wird.

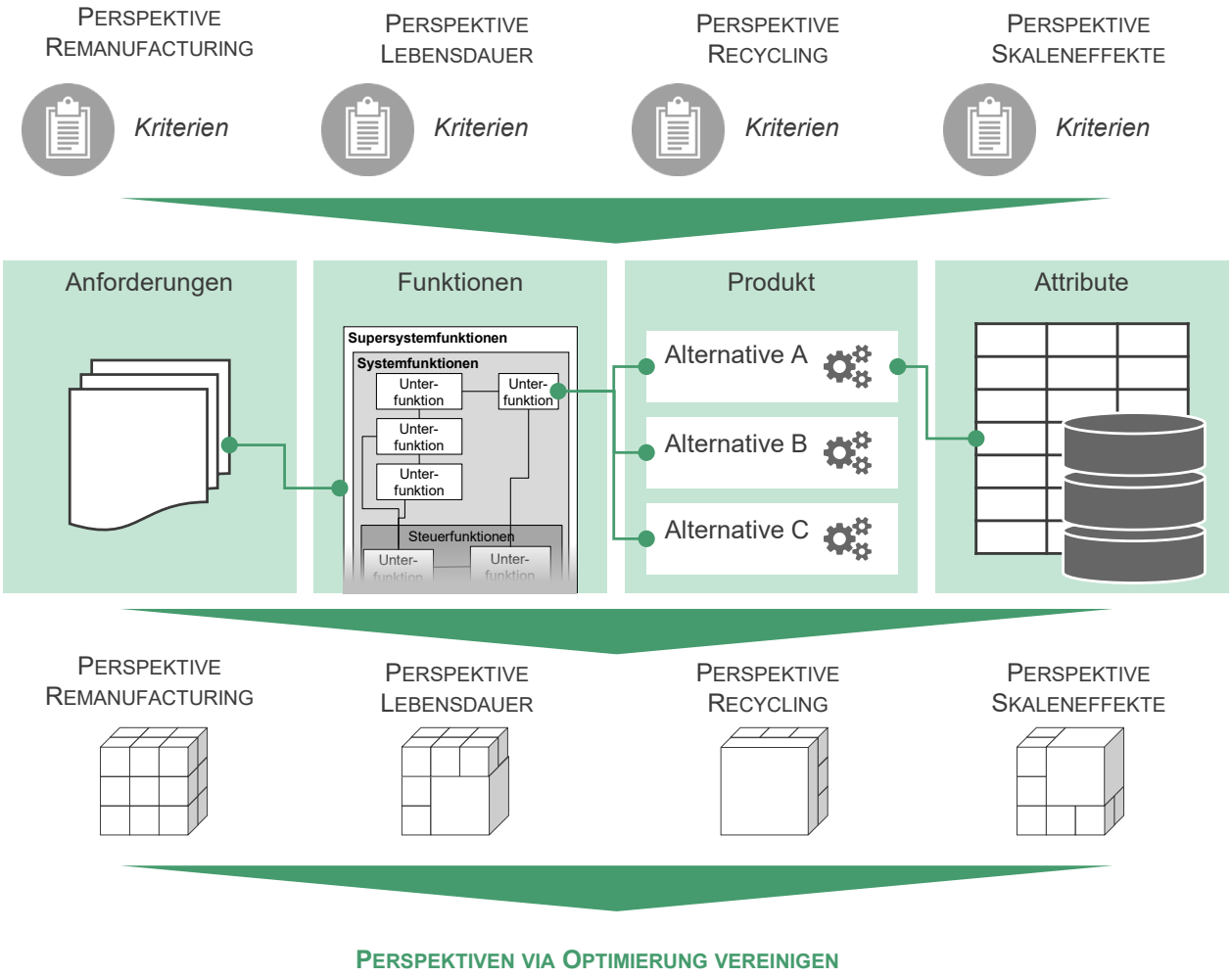


Abbildung 10: Konzept für die Modularisierung in der Circular Economy

Abschließend müssen die verschiedenen Perspektiven gemeinsam betrachtet werden, sodass möglichst synergetische Module aus einer gesamtheitlichen Perspektive entstehen. Ein Optimierungsalgorithmus kann dabei prüfen, in wie vielen Fällen welche Alter-

nativen von Produktelementen für eine Perspektive in einem gemeinsamen Modul verortet wurden. An dieser Stelle werden dem Algorithmus auch Pflichten oder Verbote bei der Zusammenstellung der Module übergeben. Das Endergebnis ist ein Vorschlag für die Modularisierung des Produktes unter Berücksichtigung der verschiedenen Perspektiven sowie möglicher alternativer Realisierungen von Produktfunktionen.

Praxisbeispiel Vaillant GmbH

Die Vaillant Group ist ein international tätiges Familienunternehmen im Bereich der Heiz-, Lüftungs- und Klimatechnik.

Abbildung 11: Die Wärmepumpe der Vaillant Group ist als Wärmeerzeuger Teil des Heizsystems und kann in Folge künftiger technologischer Innovationen modular ausgetauscht werden

Bei der Vaillant Group werden Entwicklungsziele für die System Architektur in interdisziplinären Teams erarbeitet und in Form von Use Cases definiert. Darin werden auch Aspekte der Kreislaufwirtschaft integriert. Grundlage sind neben dem Markt- und Kundenverständnis insbesondere Zukunftsszenarien, langfristige Prognosen und technologische Entwicklungen. Auf Basis dieser Use Cases wird schließlich die Architekturentwicklung, die vollständig funktionsorientiert und modellbasiert erfolgt, angegangen. Das Systemmodell der Vaillant Group umfasst die Anforderungs-, die Funktions- und die Technik-Ebene. Die Use Cases sind maßgeblicher Input für die Ebene der Anforderungen, aus welchen anschließend die Funktionen abgeleitet werden. Die Funktionen bilden dabei den Kern der System Architektur und ermöglichen ein flexibles Austauschen und Kombinieren von Elementen in der Technik-Ebene. Bei der Realisierung dieser Flexibilität, ist die Schnittstellenkompatibilität und -standardisierung eine zentrale Herausforderung.

Ein weiterer Aspekt der Veränderung in der Architekturentwicklung ist die zunehmende Verschiebung der Systemgrenze der Architekturen. So ist das Systemmodell nicht länger nur auf die Wärmeerzeuger wie z.B. eine Wärmepumpe selbst begrenzt, sondern umfasst beispielsweise das gesamte Heizsystem eines Gebäudes.

Durch die funktionsorientierte System Architektur und die Erweiterung der Systemgrenze ist die Vaillant Group in der Lage die eingangs beschriebenen funktionellen Upgrades durch Modulerweiterungen und/oder -austausche vorzunehmen. So können in einem Heizgesamtsystem beispielsweise die Heizungsrohre genauso lange verwendet werden wie das Heizsystem selbst, während Radiatoren, Speicher oder Wärmepumpen im Zuge neuer technischer Innovationen aufgewertet werden können.

2.4 Technologiebetrachtung vertikal und horizontal erweitern

Die Transformation von einer linearen zu einer zirkulären Wertschöpfung erfordert von Unternehmen, dass sie ihre Technologieplanung in zwei Dimensionen ausweiten. Ein vertikal und horizontal erweiterter Technologiebaum bildet demnach für Unternehmen die Grundlage für die Erstellung ganzheitlicher und integrierter Roadmaps zur Realisierung kreislauffähiger Produkte.

Denn zum einen ist die Technologieplanung für die Circular Economy nicht mehr nur auf die zukünftig herzustellenden Produkte eines Unternehmens ausgerichtet, sondern im Sinne der Kreisläufe werden Unternehmen mehrfach mit ihren Produkten oder Modulen dieser Produkte innerhalb eines Lebenszyklus in Kontakt kommen und müssen dementsprechend ihre Technologien auf diese neue Wertschöpfungslogik ausrichten. Es bedarf also neben der Technologieplanung für Neuprodukte, auch der Ausrichtung auf überarbeitete sowie funktional-erweiterte bzw. „upgegradete“ Produkte (z.B. über den Austausch von Modulen oder Softwareupdates).

Auf Grund der höheren Interdependenzen zwischen den verschiedenen Akteuren in der zirkulären Wirtschaft müssen Unternehmen sich zudem nicht mehr nur mit Produkt- und Produktionstechnologien befassen, die ihrer eigenen Wertschöpfung zugrunde liegen. In der Circular Economy ist es erforderlich, dass Unternehmen sich auch mit den Prozesstechnologien befassen, welche das Schließen der Kreisläufe ermöglichen, insbesondere den Technologien zum Recycling, Refurbishment und Remanufacturing. Das bedeutet nicht, dass Unternehmen alle Kreisläufe selbst schließen werden und demnach auch nicht alle Technologien selbst beherrschen müssen. Dennoch ist es erforderlich, dass ihr Einsatz im Gesamtsystem orchestriert wird und daher vorausgedacht wird. Denn in den Kreislauf-Ökosystemen der Circular Economy greifen alle Technologien und Prozesse ineinander und Kreisläufe kommen nur zur Umsetzung, wenn alle dafür erforderlichen Technologien sowohl ökonomisch als auch ökologisch tragbar im System zur Anwendung kommen können.

Um die erweiterte Technologiebetrachtung auch visuell im Technologiebaum zu etablieren, kann dieser, wie in Abbildung 12 exemplarisch dargestellt, entsprechend in zwei Richtungen erweitert werden. Mithilfe des Technologiebaums ist eine Identifikation und Strukturierung der relevanten technologischen Ressourcen und Fähigkeiten sowie die Darstellung sowohl der Beziehungen zwischen den zentralen Technologien untereinander als auch ihre Verknüpfung zur Anwendung mittels Funktionen, Modulen, Produkten und schließlich Märkten möglich [11]. Die Erweiterung in horizontaler Richtung umfasst die Erweiterung der Anwendungen um Produkte, die mithilfe von Refurbishment- und Remanufacturing-Technologien wieder einen neuwertigen oder höherwertigen Zustand erhalten sollen. Durch eine Erweiterung in vertikaler Richtung bietet sich zudem auch die

Möglichkeit, neben Technologien zur Herstellung auch die Technologien zum Schließen der Kreisläufe (Re-X-Technologien) aufzunehmen und somit aktiv zu planen.

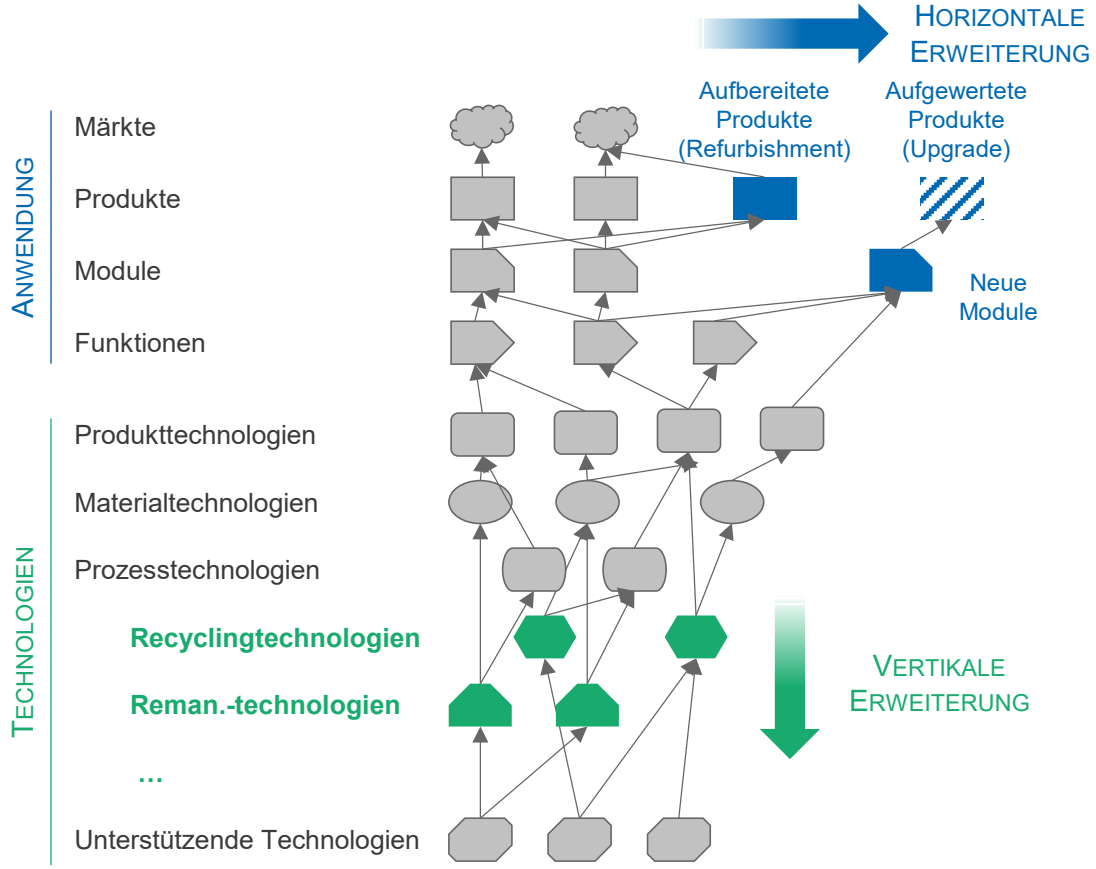


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Erweiterung des Technologiebaums

Praxisbeispiel Murrelektronik GmbH

Murrelektronik ist ein führendes Unternehmen in der Entwicklung und Herstellung hochmoderner dezentraler Automatisierungstechnik für Maschinen und Anlagen. Aus dem Bestreben, nicht nur den ökonomischen, sondern auch den ökologischen Nutzen für ihre Kund:innen zu optimieren, antizipiert das Unternehmen mit dem Wechsel von druckluftbetriebenen auf elektrisch betriebene Aktuatoren in der Fertigung einen maßgeblichen Technologiesprung im Maschinen- und Anlagenbau.

Auf dem Weg zur CO2-neutralen Produktion in der Automobilindustrie müssen die OEMs ihre Energieeffizienz in der eigenen Wertschöpfung und der Lieferkette signifikant steigern. Ein Hebel, insbesondere im Karosseriebau, ist dabei der Umstieg vom Energieträger Luft auf elektrische Energie für die Spannsysteme.

Zum automatisierten Spannen, Halten und Positionieren von Werkstücken werden in der Fertigung eine Vielzahl von Spannsystemen benötigt. Bisher kommen dabei überwiegend Pneumatikspanner zum Einsatz, die mit Pneumatikzylindern ausgestattet sind und Druckluft als Medium für die Bewegung einsetzen. Im Vergleich zu Elektromotoren weisen Druckluftsysteme jedoch einen geringen Wirkungsgrad auf. Ursache dafür ist insbesondere die energieaufwändige Erzeugung der Druckluft, bei der ein Großteil der eingesetz-

ten Energie als Verlustwärme verloren geht. Hinzu kommen Leckagen in den Verteilungsanlagen und nach weiteren Umwandlungsverlusten im Aktor steht somit nur ein geringer Anteil der eingesetzten Energie als Nutzleistung zur Verfügung.

Der Umstieg von Pneumatiklösungen auf Elektromotoren steigert neben der Energieeffizienz zudem die Flexibilität und Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Durch Elektromotoren sind nicht mehr nur zwei diskrete Positionen (z. B. auf-zu, vor-zurück), sondern eine variable Positionierung möglich und versehen mit gewisser Intelligenz können die Spanner beim Zugreifen nun gleichzeitig messen, ob beispielsweise Werkstücke korrekt positioniert sind und die korrekten Abmaße haben. Dadurch entfallen zusätzliche Sensoren, welche Pneumatikspanner heute benötigen, um die korrekte Positionierung sicherzustellen. Das bedeutet schlussendlich weniger Verkabelung und damit weniger Kupfer- und Kunststoffbedarf pro Spannsystem.

Um sicherzustellen, dass auch für die weiteren relevanten Stakeholder im Wert-schöpfungsnetzwerk dieser Technologiesprung in der Automatisierung zu einem gesteigerten Nutzen führt, hat Murrelektronik ein Konzept entwickelt, welches das Gesamtsystem vereinfacht und die Installationsaufwände signifikant reduziert. Das neuentwickelte Installationssystem Vario-X ist als modulare und hochflexible Plattform konzipiert und ermöglicht, Automatisierungsfunktionen schaltschranklos und dezentral im direkten Maschinenumfeld zu realisieren.

Herzstück sind robuste, wasser- und staubdichte Gehäuse, die unter anderem Spannungsversorgung, Steuerung, Bustechnologien und Sicherheitstechnik beinhalten. Die Installation und Verkabelung der Sensorik sowie der Aktorik erfolgt nach dem Plug-and-Play-Prinzip fehlerfrei und in kurzer Zeit. Durch die vorkonfektionierten Steckverbinder entfallen dem Systemlieferanten zudem zeitaufwändige und damit teure Installationsarbeiten am Schaltschrank, wie das Abisolieren, das Setzen von Adern-Endhülsen und das Anklemmen.

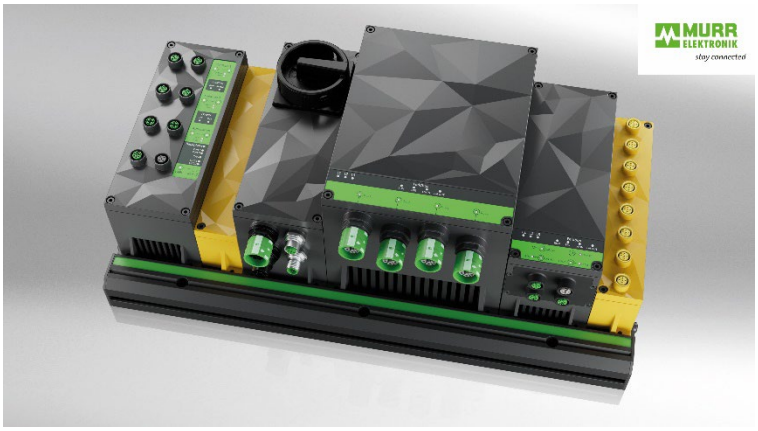


Abbildung 13: Die Automatisierungsplattform Vario-X

Um solche innovativen Produkte in kurzer Zeit auf den Markt bringen zu können, fokussiert sich Murrelektronik in der Entwicklung darauf, die zu entwickelnde Lösung systematisch in ihre einzelnen Funktionen und Komponenten zu zerlegen und die erforderlichen Technologien zur Realisierung zu ermitteln. Dadurch sind sie in der Lage, frühzeitig neue Technologiebedarfe zu identifizieren und deren effizienten Einsatz zu planen.

Am Beispiel der Entwicklung von Vario-X bedeutet dies unter anderem, dass die Rekuperation der Elektromotoren neue, entsprechend rekuperierfähige Netzgeräte erfordert, welche Murrelektronik eigens neu entwickelt.

Die Modularitäts- und Flexibilitätsanforderungen der Automatisierungsplattform gehen zudem mit der Notwendigkeit komplexer Software- und insbesondere Steuerungstechnologien einher. Da dies auch bei weiteren Automatisierungslösungen in Zukunft von hoher Relevanz sein wird, hat sich Murrelektronik bewusst dazu entschlossen, in dem Bereich der Softwaretechnologien neue Kompetenzen aufzubauen und sich damit als Unternehmen ein neues Technologiefeld zu erschließen.

Schließlich werden auch auf Material- und Fertigungsebene neue Technologien eingesetzt. Da das Unternehmen darauf achtet, Materialien und Technologien möglichst effizient einzusetzen, wird anstelle von Aluminiumfrästeilen gezielt Kunststoff-Spritzguss für dezidierte Gehäusebauteile verwendet. Die erforderliche thermische Leitfähigkeit können gewöhnliche Kunststoffe jedoch in der Regel nicht vorweisen, sodass auf Ebene der Materialtechnologien investiert wurde, um einen entsprechenden Kunststoff zu entwickeln und zu industrialisieren.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Die Circular Economy adressiert die Ressourcenverschwendung herkömmlicher, linearer Wertschöpfungssysteme, indem auf eine Wertschöpfung ohne zusätzlichen Ressourcenverbrauch abgezielt wird. Eine Realisierung von Produkten bei minimaler Umweltbelastung, die systematische Rückführung von Produkten in Kreisläufen sowie die gleichzeitige und gleichgerichtete Generierung eines ökologischen und ökonomischen Mehrwerts für relevante Stakeholder spiegeln die Kernpunkte dieses Gedankens wider. Aktuelle Produkte eignen sich bislang selten für eine Transformation zu einer Circular Economy. Der Produktmodularisierung und der Technologieplanungen kommen in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle zu, um Produkte in ein kreislauffähiges System einzubetten. Zur Entwicklung modularer, kreislauffähiger Produkte wurden vier Schritte definiert, welche die Produktmodularisierung und Technologieplanung integriert betrachten: Zu Beginn werden die Markt- und Kundenperspektive eingenommen, um sowohl Veränderungen von Kundenbedürfnissen über die Zeit iterativ zu betrachten, als auch Absatz- und Rohstoffmärkte besser zu verstehen. Um zukünftige Technologiesprünge zur Lebenszyklusverlängerung zu antizipieren, wird im zweiten Schritt eine Systemwirkungsanalyse durchgeführt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird eine Modularisierungsstrategie erarbeitet. Auf Grundlage des Model-Based Systems Engineering wird ein Systemmodell verwendet, um relevante Perspektiven für die Circular Economy mittels eines Optimierungsalgorithmus in einer ganzheitlichen Modularisierung unter Berücksichtigung technischer Restriktionen zu vereinen. Schließlich erfolgt im vierten Schritt eine erweiterte Technologieplanung mit Hilfe eines Technologiebaums, welcher die Betrachtung von neuen Produkten auf bestehende Produkte, aber auch überarbeitete und aufgewertete Produkte horizontal erweitert. Vertikal werden Technologien zum Schließen der Kreisläufe in Form von Recycling, Remanufacturing und Refurbishment ergänzt.

Mit diesen vier Schritten entsteht ein methodisches Vorgehen, welches die Rand-bedingungen der Circular Economy abbildet und in die Produktmodularisierung sowie Technologieplanung überführt. Im Ergebnis bilden diese vier Schritte ein Grundgerüst für die

zukünftige Entwicklung von Produktarchitekturen sowie das Roadmapping der erforderlichen Technologien in einer Circular Economy.

Ausblick: Weitere Befähiger einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft

Neben der Modularisierung und Technologieplanung gibt es zahlreiche weitere essenzielle Voraussetzungen für die Transformation zu einer Circular Economy: Drei an diesen Beitrag unmittelbar angrenzende Themenfelder werden daher nachfolgend als Ausblick skizziert.

Damit ein Produkt auch in zukünftigen Zyklen weiter funktionsfähig und garantiert eingesetzt werden kann, ist es wichtig, die im Produkt verbauten Module und deren Zustand genau zu kennen. Um Transparenz über die Nutzung und den Zustand von Produkten, Modulen, Komponenten und Materialien in der Kreislaufwirtschaft zu erhalten, müssen alle relevanten Informationen, die über den physischen Produktzyklus von der Entwicklung über die Produktion bis hin zur Nutzung und Weiterverwendung generiert werden, in einer digitalen Produktakte zusammengeführt werden. Die digitale Produktakte dient als Informationsgrundlage für alle Beteiligten und gibt Auskunft über die relevanten Aspekte des Produktes im Lebenszyklus. Für eine Modularisierung im Sinne der Circular Economy wird genau dieses Maß an Transparenz über Nutzung und Zustand benötigt. Der Datensatz umfasst Informationen über die Komponenten, Materialien, chemischen Substanzen, Reparaturfähigkeit, Ersatzteile und die ordnungsgemäße Entsorgung des Produkts, die in allen Phasen des Produktlebenszyklus gesammelt werden und in jeder Phase für unterschiedliche Zwecke verwendet werden können. Die Komplexität ist dabei sehr hoch, da jedes Produkt im Feld eine andere Kombination aus Originalmodulen, überholten Modulen oder bereits wiederaufbereiteten Modulen haben kann. Hersteller können die Verwendung und den Zustand eines Produkts mit Hilfe einer digitalen Produktakte „aufzeichnen“ und zurückverfolgen, was für Wiederaufbereitungsaktivitäten unerlässlich ist. Auf Basis einer fortgeschrittenen Digitalisierung von Produkten können Hersteller den Rückfluss von Produkten aus dem Feld vorhersagen und Module, die aufgearbeitet oder wiederaufbereitet werden müssen, frühzeitig identifizieren.

Die Kreislaufwirtschaft ist eine Abkehr vom traditionellen Lieferkettendenken und hin zu Zirkularitätsökosystemen. Diese Ökosysteme erfordern eine enge Zusammenarbeit zwischen vielen verschiedenen Partnern in einem eng verflochtenen Netzwerk, um die erforderlichen Technologien zu integrieren, die zur Schaffung einer Kreislaufwirtschaft erforderlich sind. Es ist wichtig zu erkennen, dass einzelne Unternehmen die Kreisläufe nicht alleine schließen können, sondern aktiv Ökosysteme aufbauen oder sich in bestehende Ökosysteme integrieren müssen. (Technologie-) Entscheidungen müssen die Auswirkungen auf alle beteiligten Organisationen berücksichtigen. Entscheidungen, die für eine Organisation vorteilhaft sind, können negative Auswirkungen auf andere haben. Daher müssen technologische Entscheidungen sowohl aus einer individuellen als auch aus einer übergreifenden Perspektive bewertet werden, um sicherzustellen, dass alle Partner im Ökosystem davon profitieren. Eine Entscheidung gilt nur dann als positiv, wenn sie allen im Netzwerk zugutekommt.

Um für die Kreislaufwirtschaft nötige Kooperationen zu verstetigen, eignen sich ergebnisorientierte Geschäftsmodelle. Durch die aktuell weitverbreiteten transaktionalen Geschäftsmodelle liegt ein Austausch von Modulen oder die Rückführung und Aufbereitung von Altprodukten nicht in der Verantwortung der Hersteller. Im Folgenden werden einige Geschäftsmodelle aufgeführt, die den Kunden zu einer Rückgabe des Produktes an den

Hersteller motivieren: *Rückkaufprogramme*, *Pfandsystem*, *Servicevertrag* und *Subskriptionsmodelle.* Im Falle eines Subskriptionsmodells verbleiben die Produkte im Eigentum des Herstellers und der Kunde bezahlt nur die Nutzung. Es erfolgt keine Rückführung aus dem Markt, sondern aus dem Produktbetrieb. Aus diesem Grund sind insbesondere Subskriptionsmodelle besonders geeignet für den Einsatz in einer Circular Economy. Generell gilt es vor dem Hintergrund der Geschäftsmodelle die Monetarisierung der zusätzlichen Wertschöpfung in der Circular Economy zu realisieren. Diese wird eine zentrale Herausforderung bei der Ausgestaltung künftiger zirkulärer Geschäftsmodelle darstellen.

Key Learnings

Übergreifend ergeben sich aus den Arbeiten der Expertengruppe folgende Implikationen für die industrielle Praxis: Erstens ist es fundamental mittels Marktanalysen und Technologieprognosen den eigenen Horizont zu erweitern. Dabei ist es aufgrund der hohen Komplexität und Dynamik von Technologien nicht mehr möglich allumfassend, deterministisch zu planen. Vielmehr gilt es Szenarien zu antizipieren und entsprechende Vorbereitungen hierfür zu treffen, indem Flexibilität für nachträgliche Produkt- bzw. Technologieänderungen vorgesehen wird.

Zweitens wird die Bedeutung von Model-Based Systems Engineering (MBSE) oder eines digitalen Zwillings in der Produktentwicklung signifikant zunehmen. Der Zugang zu Technologie und digitalen Lösungen ist in der heutigen Zeit essenziell, um erfolgreiche Produkte entwickeln zu können. Zudem gilt es bestehendes Wissen und Möglichkeiten optimal in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Ebenso entscheidend sind Fähigkeit zur Erfassung und Auswertung von Nutzungsmustern sowie Produkthistorien. Darüber hinaus müssen architektonische Entscheidungen danach beurteilt werden, inwieweit eine verbesserte Nachhaltigkeit das Potenzial für eine zukünftige Monetarisierung bietet. Schließlich ist es wichtig, Rohstoffe in verschiedenen Aufbereitungsgraden im Umlauf zu halten. Dies führt zu komplexeren zirkulären Wertschöpfungsstrukturen.

4 Literatur

[1] „Living Planet Report 2022: Building a nature-positive society," R. E. A. Almond, M. Grooten, D. Juffe Bignoli und T. Petersen, Gland, 2022. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/embargo_13_10_2022_lpr_2022_full_report_single_page_1.pdf

[2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). „Erdüberlastungstag: Ressourcen für 2022 verbraucht." umweltbundesamt.de. https://www.umweltbundesamt.de/themen/erdueberlastungstag-ressourcen-fuer-2022-verbraucht (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[3] N. K. Sharma, K. Govindan, K. K. Lai, W. K. Chen und V. Kumar, „The transition from linear economy to circular economy for sustainability among SMEs: A study on prospects, impediments, and prerequisites," *Business Strategy and the Environ-ment*, Jg. 30, Nr. 4, S. 1803–1822, 2021, doi: 10.1002/bse.2717.

[4] „Zirkuläre Geschäftsmodelle: Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen," E. G. Hansen *et al.,* München/London, 2021. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.48669/ceid_2021-8.

[5] K. Delchet-Cochet, „Introduction," in *Circular Economy: From Waste Reduction to Value Creation* (Modern Finance, Management Innovation and Economic Growth Set 3), K. Delchet-Cochet, Hg., London: ISTE, 2020, S. xvii-xx.

[6] F. Aggeri, „The Circular Economy: Historical Perspective and Contemporary Issues," in *Circular Economy: From Waste Reduction to Value Creation* (Modern Finance, Management Innovation and Economic Growth Set 3), K. Delchet-Cochet, Hg., London: ISTE, 2020, S. 1-12.

[7] Ellen MacArthur Foundation, „Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition: Vol 1," 2013. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an

[8] G. Schuh und M. Riesener, *Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools,* 3. Aufl. München: Hanser, 2017.

[9] „Die Produktionswende - Turning Data into Sustainability: Durch das Internet of Production zu nachhaltiger Produktion und Betrieb," W. Boos, Aachen, 2021. Zugriff am: 1. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wzl.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaabapamly&download=1

[10] G. Schuh und C. Dölle, *Sustainable Innovation: Nachhaltig Werte schaffen.* 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021.

[11] G. Schuh, S. Klappert und S. Orilski, „Technologieplanung," in *Technologiemanagement: Handbuch Produktion Und Management 2* (VDI-Buch), G. Schuh und S. Klappert, Hg., 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, S. 171-222.

[12] Statista Research Department. „Produktionsmenge von Glas und Glaswaren in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2021 (in 1.000 Tonnen)." de.statista.com. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/368573/umfrage/produktionsmenge-von-glas-und-glaswaren-in-deutschland/ (Zugriff am: 1. Mär. 2023).

[13] Statista Research Department. „Abnehmerstruktur der deutschen Glasindustrie nach Anteil am Produktionswert im Jahr 2021." de.statista.com. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/199453/umfrage/umsatzanteile-der-deutschen-glasindustrie/ (Zugriff am: 1. Mär. 2023).

[14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). „Glas und Altglas." umweltbundesamt.de. https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/glas-altglas#massenprodukt-glas (Zugriff am: 1. Mär. 2023).

[15] „Konsortial-Benchmarking Studie Market Intelligence: Ergebnisbericht," G. Schuh, M. Kuhn, A. Becker und A. Keuper, Aachen, 2022. Zugriff am: 1. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Alexander-Keuper-2/publication/359352188_Ergebnisbericht_Market_Intelligence_Konsortial-Benchmarking_Studie/links/6236d95cd545b77294043edf/Ergebnisbericht-Market-Intelligence-Konsortial-Benchmarking-Studie.pdf?origin=publication_detail

[16] S. Kleiner und C. Kramer, „Entwerfen und Entwickeln mit Systems Engineering auf Basis des RFLP-Ansatzes in V6," in *Entwerfen Entwickeln Erleben - Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung: 10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik KT2012,* R. Stelzer, K.-H. Grote, K. Brökel, F. Rieg und J. Feldhusen, Hg., 2012, S. 459-474.

Die Inhalte für den Vortrag 1.3 erarbeiteten die Autor:innen mit weiteren Expert:innen in dieser Arbeitsgruppe::

Michael Feucht, Endress + Hauser AG, Maulburg

Daojing Guo, Fraunhofer IPT, Aachen

Dr.-Ing. Jan Kantelberg, Vaillant GmbH, Remscheid

Alexander Keuper, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Dr.-Ing. Maximilian Kuhn, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Dr.-Ing. Marc Patzwald, Fraunhofer IPT, Aachen

Georg Rossmair, Webasto SE, Stockdorf

Leonard Schenk, Fraunhofer IPT, Aachen

Dr.-Ing. Herbert Schroth, Endress + Hauser AG, Maulburg

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen

Dr.-Ing. Ulrich Viethen, Murrelektronik GmbH, Oppenweiler

Dr.-Ing. Paul Zeller, Murrelektronik GmbH, Oppenweiler

Session 2

Resource efficient manufacturing

2.1 Fertigung für eine Kreislaufwirtschaft

T. Bergs, J. Brimmers

Gliederung

1 Einleitung 128

2 Fertigung in der Kreislaufwirtschaft 129
2.1 Einordnung 129
2.2 Der digitale Zwilling als Befähiger für die erfolgreiche Implementierung der Kreislaufwirtschaft 135
2.3 Aktuelle Herausforderungen für die Umsetzung 138

3 Perspektiven für die Fertigung in einer nachhaltigen Wirtschaft 139
3.1 Beispiele und Perspektiven für die nachhaltige Produktion 140
3.2 Beispiele und Perspektiven für die Produktion nachhaltiger Produkte 144
3.3 Vision 147

4 Zusammenfassung 148

5 Literatur 149

doi: 10.24406/publica-961

Kurzfassung

Fertigung für eine Kreislaufwirtschaft

Die nachhaltige Nutzung der Ressourcen der Erde bildet das wesentliche Ziel unserer Gesellschaft. Für die Industrie und insbesondere produzierende Unternehmen ergeben sich dadurch völlig neue Herausforderungen in der Gestaltung ressourcenschonender Wertschöpfungsketten im Sinne der Kreislaufwirtschaft sowie der schnellen Realisierung nachhaltiger Produkte. Die erfolgreiche Implementierung der Kreislaufwirtschaft in produzierenden Unternehmen bedarf dabei verschiedener Ansätze - die Betrachtung der Umweltwirkung des Fertigungsprozesses, die Optimierung der fertigungsbedingten Produkteigenschaften, die Analyse der Korrelation zwischen Produktion und Nutzung sowie die Erarbeitung neuer Geschäftsmodelle zur Werterhaltung bzw. –steigerung. Der digitale Zwilling stellt hierfür das notwendige Werkzeug bzw. die Befähigung für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Ansätze dar. Gleichzeitig ist der digitale Zwilling auch der wesentliche Befähiger für die schnelle Entwicklung von Fertigungsprozessen für die Bereitstellung nachhaltiger Produkte. Für diese beiden Ansätze werden in dem vorliegenden Beitrag verschiedene Beispiele vorgestellt, anhand derer die Möglichkeiten und Perspektiven einer nachhaltigen Produktion aufgezeigt werden. Ferner lassen sich aus den Beispielen Handlungsempfehlungen für die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft für produzierende Unternehmen ableiten.

Schlagwörter: Kreislaufwirtschaft, Nachhaltige Produktion, Digitaler Zwilling, Produktion nachhaltiger Produkte

Abstract

Manufacturing for a Circular Economy

The sustainable use of the earth's resources forms the essential goal of our society. For industry, and in particular for manufacturing companies, this poses completely new challenges in the design of resource-conserving value chains in the sense of the circular economy and the rapid realization of sustainable products. The successful implementation of the circular economy in manufacturing companies requires different approaches - the consideration of the environmental impact of the manufacturing process, the optimization of the manufacturing-related product properties, the analysis of the correlation between production and use as well as the development of new business models to maintain or increase value. For this purpose, the digital twin represents the necessary tool or the enablement for a successful implementation of these approaches. At the same time, the digital twin is also the essential enabler for the rapid development of manufacturing processes for the provision of sustainable products. For both of these approaches, this paper presents various examples that are used to demonstrate the possibilities and perspectives of sustainable manufacturing. Furthermore, recommendations for action for the implementation of a circular economy for manufacturing companies can be derived from the examples.

Keywords: Circular economy, Sustainable production, Digital twin, Production of sustainable products

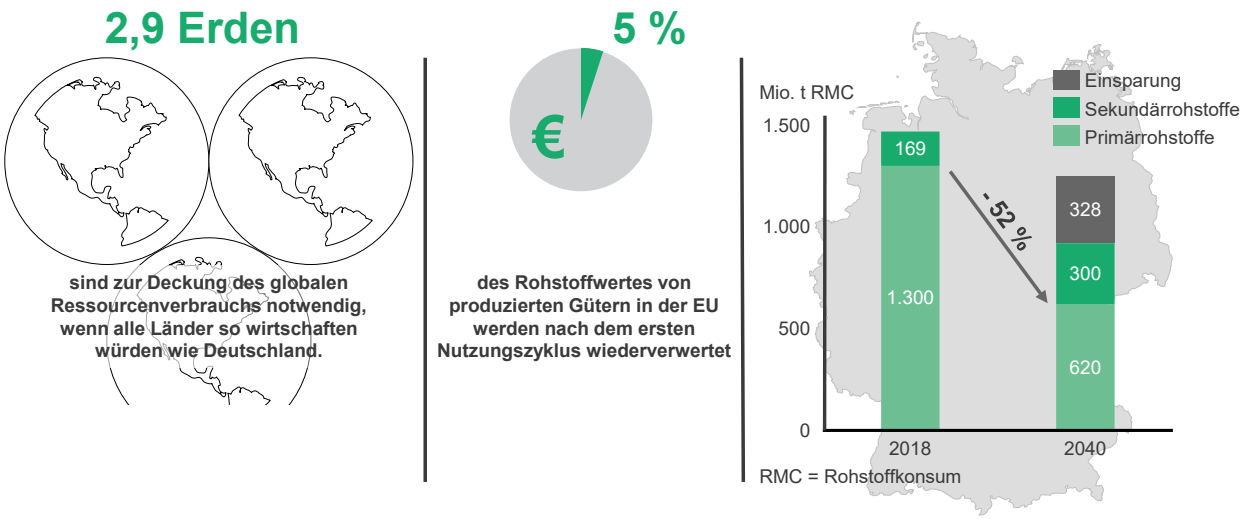
1 Einleitung

Die nachhaltige Nutzung der Ressourcen auf unserem Planeten ist das große Ziel unserer und der nachfolgenden Generationen. Die United Nations haben gemeinsam im Jahr 2015 17 Ziele unter dem Titel *Sustainable Development Goals* (SDG) festgelegt [1]. Insbesondere die Ziele 9, 11, 12, und 13 zeigen die Notwendigkeit für innovative und nachhaltige Produkte für die Zukunft auf, siehe Abbildung 1.

Abbildung 1: Sustainable Development Goals der United Nations

Der im Jahr 2020 durch die Europäische Union verabschiedete *Green Deal* tituliert die Klimaneutralität im Jahr 2050 als notwendiges Ziel und greift die Zielstellung der United Nations auf [2]. Insbesondere der Kreislaufwirtschaft wird im Europäischen *Green Deal* ein wesentlicher Fokus zu teil. Es werden 35 Aktionspunkte formuliert, wodurch die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft durch vielfältige Maßnahmen gefördert werden. Die Gestaltung der Designprozesse von nachhaltigen Produkten sowie die Entwicklung von nachhaltigen Produktionsprozessen beschreibt abgeleitet aus dem *Green Deal* die Zielsetzung für die produzierende Industrie. Die Dringlichkeit der Umsetzung wird in Abbildung 2 verdeutlicht. Der aktuelle Ressourcenverbrauch in Deutschland entspricht der zur Verfügung stehenden nachwachsenden Ressourcen von 2,9 Erden. Ebenso zeigt sich, dass der Ressourcenverbrauch von Primärrohstoffen bis 2040 um 52 % gesenkt werden muss, um die Klimaziele zu erreichen.

Diese Thematik war Inhalt vieler wissenschaftlicher Publikationen in den letzten Jahren. Jedoch sind die dargelegten Ansätze in den wissenschaftlichen Publikationen mehrheitlich methodischer Natur [3]. Dies liegt unter anderem in den zahlreichen Herausforderungen zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft in dem bisherigen Wertesystem begründet [4]. Das Thema der Kreislaufwirtschaft zeigt jedoch eine hohe Relevanz für die Zielerreichung der SDG und somit auch für den *Green Deal* der Europäischen Union [5].



Quellen: UBA22; Ellen MacArthur Foundation15; Circular Economy Initiative21

Abbildung 2: Der hohe Ressourcenverbrauch erfordert ein Umdenken der Industrie

Die Fragestellung, welche Herausforderungen aus der Sicht eines produzierenden Unternehmens bestehen und mit welchen Maßnahmen man kurz- und langfristig eine Kreislaufwirtschaft für technische Produkte erreichen kann, stellt den Kern des vorliegenden Beitrags dar. Dazu wird im ersten Teil des Beitrags zunächst eine Einleitung in die Thematik gegeben und dabei der Fokus insbesondere auf die Fertigung von höherwertigen, technischen Produkten gelegt. Der digitale Zwilling wird als Befähiger für eine wirkungsvolle Umsetzung der Kreislaufwirtschaft herausgestellt und die Herausforderungen für dessen Implementierung dargelegt. Anschließend werden aus der Perspektive produzierender Unternehmen verschiedene Anwendungsbeispiele zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft vorgestellt.

2 Fertigung in der Kreislaufwirtschaft

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft stellt einen wesentlichen Lösungsansatz für die Industrie zur Erreichung der Klimaziele dar [5]. Aus Sicht der Fertigung als wichtige Phase im Produktlebenszyklus gilt es daher in Schritten eine Einordnung in die Thematik der Kreislaufwirtschaft zu geben. Hierfür werden im Folgenden die bestehenden Definitionen und Konzepte zum Produktlebenszyklus und der Kreislaufwirtschaft zusammengefasst und aus Sicht eines produzierenden Unternehmens beleuchtet.

2.1 Einordnung

Produktlebenszyklus

Der Lebenszyklus eines Produktes erstreckt sich über die folgenden fünf Phasen, welche auf der linken Seite in Abbildung 3 dargestellt sind [6], [7]:

- Produktidee
- Produktdesign und -entwicklung
- Produktfertigung und -montage
- Produktnutzung
- Produktlebensende

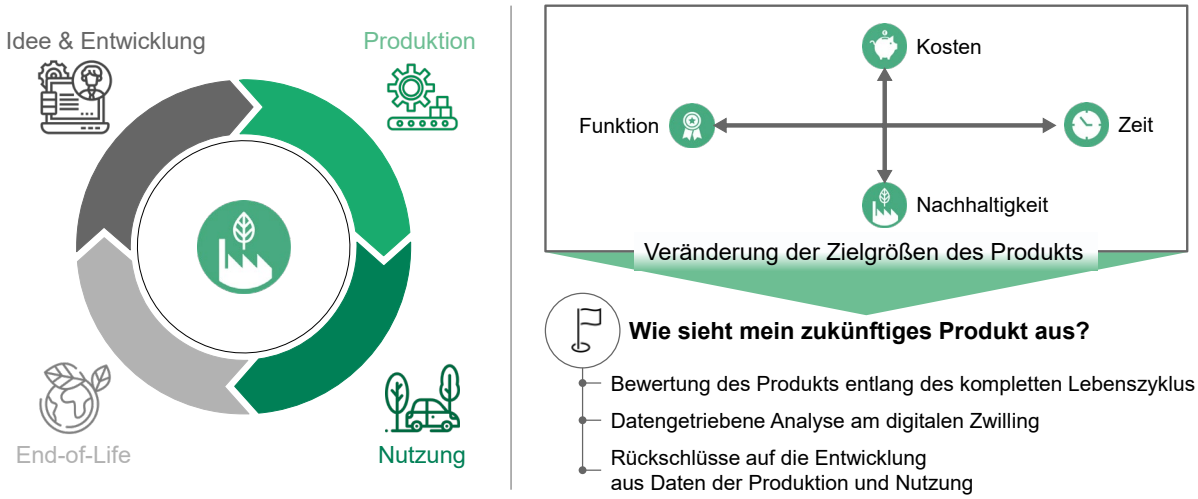


Abbildung 3: Produktlebenszyklus und veränderte Zielgrößen für die Produktentwicklung, -produktion und -nutzung

Je nach Produktart werden unterschiedliche Anforderungen an die fünf Phasen im Produktlebenszyklus gestellt. Diese Anforderungen ergeben sich zum Beispiel aus den bestehenden Regularien und gesetzlichen Vorschriften, aus Kundenforderungen und der bestehenden Wettbewerbssituation im Markt. Die an das Produkt gestellten Anforderungen werden in der Produktentwicklungsphase in eine Produktfunktionalität bzw. in Produkt-eigenschaften umgewandelt.

Diese Produktfunktionalitäten bzw. –eigenschaften gilt es im Schritt der Produktfertigung und –montage sicherzustellen. Dabei steht die Produktion bisher in einem Zielkonflikt aus Funktionserfüllung, Kosten und Produktionszeit. Zur Sicherstellung der avisierten Klimaziele, siehe Kapitel 1, ist zukünftig auch eine Betrachtung der Nachhaltigkeit notwendig, siehe rechte Seite Abbildung 3. Es gilt daher sowohl den ökologischen Fußabdruck des Produktes als auch den ökologischen Fußabdruck des Produktionsprozesses zu reduzieren. Dies kann beispielsweise durch die Verwendung regenerativer Energien sowie nachwachsender oder recycelter Rohstoffe erfolgen.

Die Produktnutzung bildet in der Regel die zeitlich längste Phase im Produktlebenszyklus. Die wichtigsten Zielgrößen stellen hierbei die Produktverfügbarkeit in Hinblick auf die Funktionalität sowie die Betriebskosten dar. Zukünftig wird ebenfalls eine ökologische Bewertung der Produktnutzung erfolgen müssen. Hierbei ist zu beachten, dass die Nachhaltigkeit eines Produktes während der Nutzung bereits in der Entwicklungsphase und der Produktionsphase wesentlich beeinflusst wird [8]. So kann beispielsweise der Wirkungsgrad eines Getriebes wesentlich durch die Oberflächenbeschaffenheit der Zahnräder beeinflusst werden. Die Definition dieser Oberflächenbeschaffenheit erfolgt im Entwicklungsprozess, wobei die Erzeugung dieser Oberfläche in der zum Teil energie- und ressourcenintensiven Produktionsphase vollzogen wird. Dies verdeutlicht, dass für eine objektive Nachhaltigkeitsbewertung nicht nur die singuläre Betrachtung der einzelnen Produktlebensphasen, sondern vielmehr die ganzheitliche Betrachtung aller Phasen des Produktlebenszyklus notwendig ist.

Das Produktlebensende markiert einen Meilenstein im Produktlebenszyklus. Das Produktlebensende ist definiert als der Zeitpunkt, indem das Produkt die geforderte Produktfunktionalität nicht mehr erfüllen kann. Es kann dabei zwischen End-of-Use (EOU) und End-of-Life (EOL) unterschieden werden [9]. EOU beschreibt den Zustand, in dem das Produkt durch eine gezielte Maßnahme wieder die angedachte Funktionalität zumindest

teilweise erfüllen kann, wobei EOL das vollständige Lebensende des Produktes beschreibt. Bei Erreichung des EOL bleibt letztlich nur doch die Rückführung der Produkte in den Kreislauf in Form von Recyclingprozessen oder anderen Methoden der stofflichen Verwertung. Neben dem tatsächlichen EOU oder EOL eines Produktes, gibt es eine Produktlebensdauer, welche für die Entwicklungsphase als Zielgröße dient. Je nach Produkttyp kann die Produktlebensdauer beispielsweise in Betriebsstunden, Kilometer oder Lastwechseln gemessen werden. Zielsetzung eines nachhaltigen Produktes in einer Kreislaufwirtschaft ist es daher, seine Lebensdauer im Sinne des EOL bzw. EOU zu maximieren. Bereits an dieser Stelle sei die besondere Bedeutung der verwendeten Fertigungsmethode erwähnt, da diese maßgeblich für die Langlebigkeit sowie die Effizienz des Produktes verantwortlich ist. Deren Gestaltung vor dem Hintergrund einer maximalen Ressourceneffizienz steht später noch im Fokus dieses Beitrags.

Kreislaufwirtschaft

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft stellt die Operationalisierung der Umsetzung eines nachhaltigen Produktes dar [4]. Das Verständnis des Begriffes Kreislaufwirtschaft für den vorliegenden Bericht knüpft dabei an die Interpretation des Begriffes nach Kirchherr et al. an [4]. Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, das Konzept des EOL durch Reduzierung (Reduce), Weiternutzung (Reuse), Recycling oder Rückgewinnung (Recover) von Material in der Produktions-. Distributions- und Nutzungsphase zu verlängern [3], [4]. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft findet die Umsetzung auf mehreren Skalen: Makro (Ebene der Produktionssysteme), meso (Sektorebene), mikro (Firmenebene) und nano (Produktebene) [10]. Ebenso deckt die Kreislaufwirtschaft Aspekte der ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit ab [4]. Aus Sicht der Produktion und produzierender Unternehmen wird der Begriff der Nachhaltigkeit jedoch mit dem Fokus auf die ökologische Nachhaltigkeit interpretiert [3].

In der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft wird in der Literatur zwischen unterschiedlichen Rahmenwerken/Klassifikationen unterschieden. Diese Klassifikationen unterscheiden sich in der Granularität der möglichen Strategien und werden als R-Szenarien bezeichnet. In der Literatur wird zwischen 3R [11], 4R [12], 6R [13] bis hin zu 9R [14] unterschieden. Die neun Szenarien gemäß 9R sind in Abbildung 4 dargestellt.

Die neun R-Szenarien können in drei wesentliche Klassen aufgeteilt werden. Die Strategien Refuse (R0), Rethink (R1) und Reduce (R2) setzen dabei eine neuartige und innovative Produktentwicklung und –produktion voraus. Refuse (R0) führt zu einer Reduzierung der Produktvielfalt durch Funktionstrennung oder zu einer radikalen und innovativen Neukonzeption des Produktes mit bisherigem Funktionsumfang. Rethink (R1) beschreibt das Umdenken in der Nutzung der bestehenden Produkte und damit die Erhöhung der Auslastung eines Produktes durch beispielsweise Erweiterung des Nutzerkreises durch Sharing-Konzepte (Car-Sharing, Abomodelle, etc.). Das Szenario Reduce (R2) deckt sich dabei mit dem bekannten Grundgedanken einer Prozess- und Produktoptimierung, wobei bisher primär die Kosten und die Produktionszeit als Optimierungsgröße herangezogen wurden und zukünftig zusätzlich die Nachhaltigkeit bzw. der ökologische Fußabdruck als Zielgröße berücksichtigt werden sollte.

Die zweite Klasse umfasst die Szenarien Reuse (R3), Repair (R4), Refurbish (R5), Remanufacture (R6) und Repurpose (R7). Diesen Szenarien ist der Grundgedanke der Verlängerung der Produktlebensdauer und damit die Verschiebung des EOU oder EOL auf einen späteren Zeitpunkt gemein. Reuse (R3) beschreibt die Möglichkeit der Weiternutzung des bestehenden Produkts bei gleicher Funktionalität durch einen anderen Nutzer

bzw. eine andere Entität. Voraussetzung dafür ist, dass das bestehende Produkt noch in einem gebrauchsfähigen Zustand ist, und die Funktionserfüllung sichergestellt ist. Repair (R4) ist die Reparatur und Instandsetzung eines defekten Produktes, sodass die eigentliche Funktion wieder erfüllt werden kann. Refurbish (R5) beschreibt die Instandsetzung und das gleichzeitige Update eines bestehenden Produktes, wobei teilweise neuere oder hochwertigere Teilkomponenten verbaut oder der Funktionsumfang erweitert oder erneuert werden kann. Remanufacture (R6) beschreibt die Nutzung von noch gebrauchsfähigen Teilkomponenten eines defekten Produktes, um daraus ein neues Produkt mit der gleichen Funktion zu erzeugen. Dabei besteht die Möglichkeit auch Teilkomponenten komplett neuzufertigen. Repurpose (R7) verfolgt den selben Gedanken der Weiternutzung von Teilkomponenten, hier jedoch mit dem Ziel ein Produkt zu schaffen, welches eine andere Funktion als das Produkt erfüllt, aus welchem die Teilkomponenten entnommen wurden.

Abbildung 4: 9R-Szenarien in der Kreislaufwirtschaft nach der Darstellung in [4], [14]

Die dritte Klasse beinhaltet die Szenarien Recycle (R8) und Recover (R9). Bei dieser Klasse kann das Produkt nicht mehr verwendet werden, daher wird hier auf das Material fokussiert. Recycle (R8) beschreibt die Rückgewinnung der Materialien entweder in gleicher oder in reduzierter Materialqualität. Diese Materialien können anschließend wieder für die Produktion von neuen Produkten verwendet werden. Recover (R9) stellt die letzte Möglichkeit für ein Produkt dar, da hier das verwendete Material nicht wiederverwendet werden kann. Daher ergibt sich beispielsweise nur die Möglichkeit der thermischen Verwertung. Dieses Szenario charakterisiert den Zustand mit dem geringsten Potenzial der Nachhaltigkeit. Wie links in Abbildung 4 dargestellt, steigt das Nutzenpotenzial der Kreislaufwirtschaft in umgekehrter Reihenfolge von Recover (R9) hin zu R0 (Refuse). Die Szenarien Recycle (R8) und Recover (R9) stellen in vielen Industriezweigen aktuell den Status Quo dar, jedoch zeichnen sich diese Ansätze durch eine geringe Werterhaltung aus. Daher sollte es in der Zukunft das Ziel sein, die Szenarien R7-R0 zu verfolgen, sodass eine höhere Werterhaltung oder sogar eine Wertsteigerung für die Produkte erreicht werden.

In der Quantifizierung des ökologischen Fußabdrucks von Unternehmen und Organisationen unterscheidet man in sogenannte "Scopes" oder Emissionsbereiche [15]:

- Scope 1: Dieser bezieht sich auf direkte THG-Emissionen, die aus Quellen stammen, die sich innerhalb der Kontrolle des Unternehmens oder der Organisation befinden, wie z.B. Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen in firmeneigenen Anlagen oder Fahrzeugen.
- Scope 2: Dieser bezieht sich auf indirekte THG-Emissionen, die durch die Erzeugung von gekauftem Strom, Wärme oder Kälte entstehen, die das Unternehmen oder die Organisation nutzt. Diese Emissionen fallen außerhalb des direkten Einflussbereichs des Unternehmens oder der Organisation an, aber sie können durch den Kauf von erneuerbaren Energien reduziert werden.
- Scope 3: Dieser bezieht sich auf alle anderen indirekten THG-Emissionen, die im Zusammenhang mit den Aktivitäten des Unternehmens oder der Organisation entstehen, aber außerhalb der Kontrolle des Unternehmens oder der Organisation liegen. Dies kann zum Beispiel Emissionen aus der Produktion von Rohstoffen, aus der Entsorgung von Abfällen oder aus der Nutzung von Produkten und Dienstleistungen sein.

Insbesondere produzierende Unternehmen, die ein Bestandteil einer Wertschöpfungskette ohne eigene Verantwortung für das spätere Produkt sind, stehen vor der Herausforderung die entstehenden THG-Emissionen in Scope 3, also unter Einbezug vor- und nachgelagerter Prozessschritte zu quantifizieren. Hier fehlt oftmals der Zugang zu Daten aus diesen vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsstufen, um die Scope3-Wirkungen rechnerisch zu bestimmen.

Insgesamt sind die Gestaltungsräume produzierender Unternehmen insbesondere mit Produktverantwortung, OEMs im Business-to-Customer (B2C) oder Produktionsausrüster, Werkzeugbauer im Business-to-Business (B2B), vielfältig, da entsprechende Spielräume für lebenszyklusübergreifende Optimierungsmaßnahmen im Sinne der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtung gegeben sind. Nimmt man demgegenüber die Perspektive eines produzierenden Unternehmens, bspw. Komponentenherstellerinnerhalb einer Wertschöpfungskette ein, so sind die Gestaltungsmöglichkeiten deutlich eingeschränkter, was auf den zuvor bereits erwähnten, fehlenden Zugang zu entsprechenden Daten außerhalb der eigenen Wertschöpfungsstufen bzw. Lebenszyklusphasen zurückzuführen ist. Mit Bezug auf die oben genannten R-Szenarien ergeben sich für die produzierenden Unternehmen aus Sicht der Fertigung vier wesentliche Nachhaltigkeitsansätze. Diese vier Ansätze sind in Abbildung 5 dargestellt.

Der erste Ansatz, oben rechts, beschreibt die transparente und ökologisch nachhaltige Gestaltung der Fertigungsprozesse sowie deren Optimierung. Für diesen Ansatz finden R-Szenarien aus der ersten und zweiten Klasse Anwendung (R0 – R7). Standen hierfür bislang die Fertigungskosten und –zeiten im Vordergrund einer Bewertung und Optimierung, so werden nun zusätzlich die ökologischen Auswirkungen einbezogen. Dazu müssen die verwendeten In- und Outputgrößen, wie Materialeinsatz (Werkstück- und Werkzeugmaterialien), die Betriebsstoffe sowie die benötigte Energie für jeden Prozess und über die Prozesskette hinweg betrachtet und bewertet werden. Hier sei bereits auf die Bedeutung des digitalen Zwillings verwiesen, der die notwendige Transparenz und damit den Zugang zu den relevanten Informationen bauteilbezogen verschafft. Perspektivisch wird mit dem digitalen Zwilling eine Bewertungsgrundlage auch für zunehmend flexible und automatisierbare Montage- und Fertigungsprozesse zur Verfügung stehen, welche eine kostengünstige Bearbeitung von hochindividuellen Bauteilen, beispielsweise in einem Reparaturprozess, erlauben [16]. Dabei steht vor allem die Reduzierung des manuellen Aufwandes beispielsweise für eine anfängliche Befundung von defekten Produkten,

als Ausganspunkt für eine angepasste du ökologische Fertigungsplanung im Vordergrund. Auch hier bildet zukünftig der digitale Zwilling eine notwendige Voraussetzung.

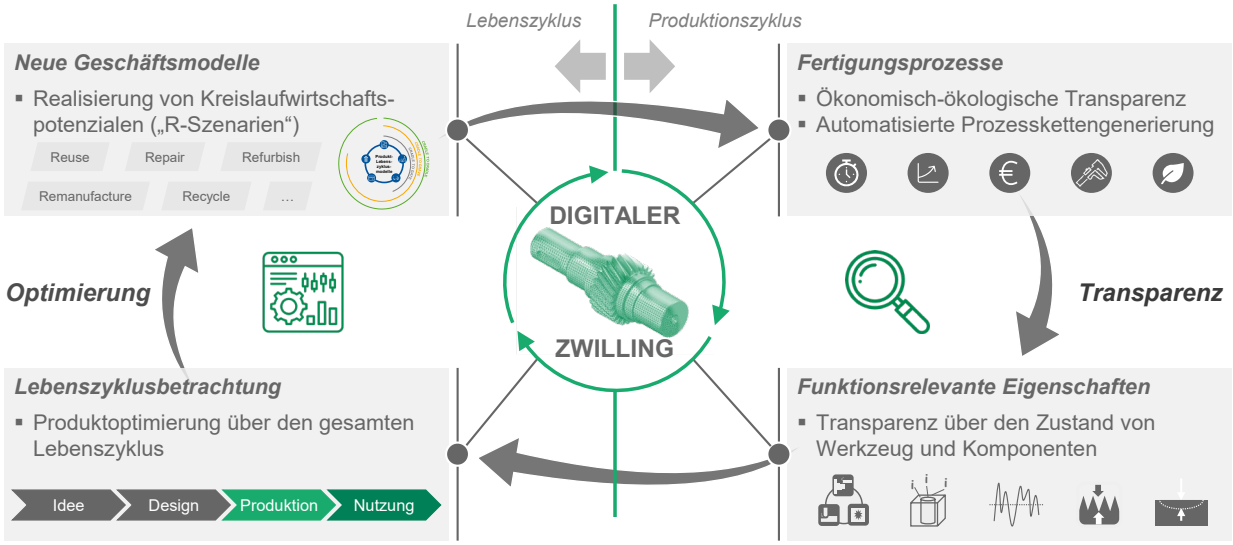


Abbildung 5: Nachhaltigkeitsansätze für produzierende Unternehmen

Der zweite Ansatz, unten rechts, befasst sich mit der gezielten Erzeugung fertigungsbedingter Funktionalität und funktionsrelevanten Eigenschaften der Produkte. Die Grundlage für diesen Ansatz bildet eine erhöhte Informationstransparenz im Hinblick auf die Wirkung des Fertigungsprozesses auf das Produkt - auch hier mit Hilfe des digitalen Zwillings. In Hinblick auf die R-Szenarien kann dieser Ansatz dem Szenario Reduce (R2) zugeordnet werden. Dies setzt jedoch seitens des Komponentenherstellers die Kenntnis über die Wirkung der erzeugten Bauteilfunktionalität auf die spätere Bauteilnutzung voraus. So kann bspw. eine Bauteiloberfläche spezifiziert werden, welche im tribologischen System eine geringere Verlustleistung durch reduzierte Reibung und damit einen höheren Wirkungsgrad in der Bauteilnutzung zur Folge hat. Genauso können durch innovative und neue Fertigungstechnologien Produkteigenschaften erzeugt werden, welche mit bisher bekannten Prozessen ggf. nicht herstellbar sind. Diese neuen Produkteigenschaften könnten zukünftig dann auch zu einer Steigerung der Effizienz und zur Reduzierung des Materialeinsatzes bei neuen Produkten führen.

Die Beschreibung der funktionsrelevanten Eigenschaften im digitalen Zwilling ermöglicht eine Erweiterung des Betrachtungsrahmens zum Lebenszyklus des betrachteten Produktes. Dieser dritte Ansatz, unten links, schafft letztlich die Informationsbasis, um mit Hilfe geeigneter Bilanzierungsmethoden (Life Cycle Assesment, LCA) eine ganzheitliche lebenszyklusübergreifende Produktoptimierung durchzuführen. Die Bilanzierungsmethoden ermöglichen somit eine Quantifizierung des ökologischen und ökonomischen Fußabdruckes des Produktes und bilden für das produzierende Unternehmen eine weitere wichtige Bewertungsbasis. Basierend auf diesen Kennwerten kann eine Optimierung des Produktes stattfinden. Dadurch können auch innovative Ansätze anhand der R-Szenarien (R0 - R9) für die Erhaltung bzw. Steigerung des Produktwertes bewertet und neue Geschäftsmodelle realisiert werden (Vierter Ansatz, oben links).

Die neuen Geschäftsmodelle ergeben geänderte Herausforderung für die Produktion der Produkte. Dadurch wird der Fokus vom Lebenszyklus auf den Produktzyklus verändert, und es ergeben sich weitere Ansätze zur Optimierung der Fertigungstechnologie zur Steigerung der Nachhaltigkeit in produzierenden Unternehmen. Dabei haben die vier Ansätze

gemein, dass die Erfolgschance stark von der Verfügbarkeit von nutzbaren Daten abhängt. Nur mit qualitativ hochwerten Daten zum Produkt, zur Produktion und zu dem Nutzungsverhalten der Produktanwender können die vier Ansätze erfolgreich umgesetzt werden. Daher ist der digitale Zwilling der wesentliche Befähiger, um diese vier Ansätze gewinnbringend im produzierenden Unternehmen umzusetzen.

2.2 Der digitale Zwilling als Befähiger für die erfolgreiche Implementierung der Kreislaufwirtschaft

Die zuvor aufgezeigten Ansätze zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in produzierenden Unternehmen setzen die Verfügbarkeit unterschiedlicher Informationen in allen Phasen des Produktlebenszyklus voraus. Dies gelingt in Form des bereits erwähnten digitalen Zwillings, welcher sowohl den technischen Zustand des Produktes entlang seines Lebenszyklus als auch die dabei eingesetzten Ressourcen, gerne auch als Rucksack bezeichnet, bereitstellen kann. Grundsätzlich wird der digitale Zwilling dabei als digitale Abbildung eines realen Objekts verstanden, welches in der Herstellung eine prozessbedingte Zustandsänderung erfährt [17]. Einzelne Fertigungsprozesse führen Veränderungen zwischen einzelnen zeitdiskreten Zuständen des digitalen Zwillings herbei und beeinflussen funktionsbestimmende Eigenschaften [17]. Dadurch ist es sowohl möglich die Einzelprozesse, die Verkettung von Prozessen in ihrer Wirkung auf die funktionsbestimmenden Eigenschaften sowie auf die ökologischen Kennzahlen näher zu analysieren. Führt man den Gedanken weiter, so können mit dem digitalen Zwilling relevante Daten aus der Entwicklungsphase, der Produktionsphase bis hin zur Nutzung- und EOL-Phase integral zusammengeführt und eine ganzheitliche Bewertung der Nachhaltigkeit vorgenommen werden. Selbst am Ende der Nutzungsphase liegen folglich die notwendigen Informationen über den Produktzustand vor, die eine weitere stoffliche Verwertung im Sinne der R-Zyklen ermöglichen.

Die wesentlichen Funktionen des digitalen Zwillings aus Sicht eines produzierenden Unternehmens sind in Abbildung 6 dargestellt. Neben einem einzelprozessspezifischen Fokus (vertikale Ebene) des digitalen Zwillings wird ebenso die Verknüpfung von mehreren Einzelprozessen zu einer Prozesskette (horizontale Ebene) durch den digitalen Zwilling des Produktes abgebildet, siehe Abbildung links. Für die Umsetzung und Nutzung des digitalen Zwillings in der Fertigung ist auf vier Aspekte besonders zu achten.

Der erste Aspekt umfasst die wesentlichen Aufgaben zur Datenakquisition und Konnektivität. Dazu zählen die Aufnahme und strukturierte Speicherung von heterogenen Daten entlang des Lebenszyklus des Produktes. Die zu speichernden Daten sind dabei von Produkt zu Produkt verschieden und richten sich primär nach der Relevanz der Daten für die spätere Funktionserfüllung des Produktes [17]. Dies kann als Lastenheft verstanden werden, welches die Gesamtheit der Anforderungen an das Produkt zusammenführt und damit den Umfang der zu erhebenden Daten vorgibt [17]. Ebenso bilden diese Daten die Grundlage für die Analyse und Optimierung des Einzelprozesses oder der Prozesskette und ihrer Wechselwirkungen. Die geschaffene Informationstransparenz durch den digitalen Zwilling spiegelt sich an dem ersten Ansatz zur Steigerung der Nachhaltigkeit in den Fertigungsprozessen wider, vgl. Abbildung 5 oben rechts.

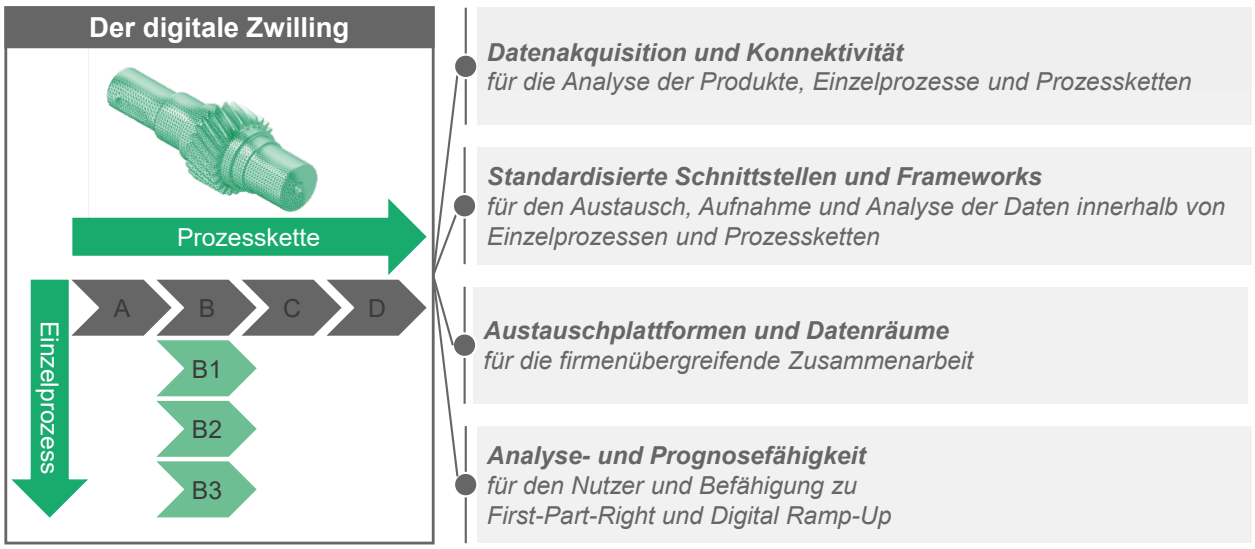


Abbildung 6: Voraussetzungen für die Umsetzung des digitalen Zwillings als Befähiger der Kreislaufwirtschaft aus Sicht der Fertigung

Eine weitere Voraussetzung bildet die Bereitstellung von standardisierten Schnittstellen und Frameworks innerhalb eines Prozesses und entlang einer Prozesskette. In beiden Fällen wird so ein Austausch sowie die Aufnahme und Analyse von Daten unterschiedlichster Datenquellen und -formate gewährleistet. Beispielsweise kann ein firmeninterner Austausch von Daten erfolgen, ohne dass es zu Fehlinterpretationen der Daten bzw. der daraus abgeleiteten Information kommen kann. Dadurch können die funktionsrelevanten Eigenschaften des Produktes eindeutig beschrieben werden, vgl. Abbildung 5 unten rechts.

Für die Erzeugung und Nutzung des digitalen Zwillings gibt es bereits erste Initiativen zur Schaffung standardisierter Formate und Architekturen. Für die Fertigung hat sich beispielsweise das Digital-Twin-Framework nach ISO 23247 etabliert [18]. Dieses Framework basiert auf einer Lambda-Architektur und besitzt unterschiedliche Ebenen und Domänen. Neben dem Batch-Layer zur Verarbeitung von großen Datenmengen, bildet der Stream-Layer die Voraussetzung für eine echtzeitfähige Verarbeitung von Datenpaketen. Das Framework baut dabei auf den folgenden vier Domänen auf [17]:

- Benutzerdomäne: Menschen, Geräte, Systeme, welche Anwendungen und Dienste aus der Kerndomäne nutzen
- Kerndomäne: Betrieb und Verwaltung des digitalen Zwillings (Bereitstellung, Überwachung, Optimierung, etc.)
- Datenerhebungsdomäne: Überwachung und Sammlung sensorischer Daten
- Beobachtbare Fertigungsdomäne: Physische Fertigungsressourcen wie Personal, Ausrüstung, Material usw.

Mithilfe dieses Frameworks soll zukünftig ein Standard zur Umsetzung eines digitalen Zwillings innerhalb eines produzierenden Unternehmens möglich werden.

Neben derartigen Initiativen gibt es bereits standardisierte Datenformate, welche innerhalb des digitalen Zwillings zur Datenspeicherung und auch zum Datenaustausch zu definierten Zeitpunkten genutzt werden können. Ein Beispiel für ein solches Datenformat stellt das *Gear Data Exchange* (GDE) Format im Bereich der Verzahnungsfertigung dar. Dieses Format ist nach VDI 2610 festgelegt, basiert auf der Extended Markup Language

(XML) und existiert seit 2018 [19]. Anhand dieses Formats können die Geometrie, die gewünschten Fertigungstoleranzen, die Messanweisungen, sowie Messergebnisse und die Fertigungsprozesse bauteilspezifisch dokumentiert werden. Über dieses standardisierte Dateiformat kann somit ein Austausch zwischen Maschinen (bspw. Verzahnungsschleifmaschine und Verzahnungsmessmaschine zur automatischen Fertigungskorrektur) aber auch firmenübergreifend (Verzahnungsausleger und Werkzeughersteller für die Werkzeugherstellung) erfolgen. Durch die definierten Inhalte und die standardisierte Interpretierbarkeit der Daten, ist eine fehlerreduzierte Verarbeitung der Daten gegeben.

Einen Schritt weiter gehen aktuelle Initiativen zur Schaffung gemeinschaftlicher Datenökosysteme und firmenübergreifender Austauschplattformen. Ein bekannter Vertreter für ein gemeinschaftliches Datenökosystem stellt die Plattform *Catena-X* dar. *Catena-X* ist ein Zusammenschluss aus zahlreichen Firmen im Bereich der Automobilindustrie. Dabei ist die Vision ein kollaboratives, offenes und sicheres Datenökosystem bereitzustellen, welches die unterschiedlichen Akteure in den Wertschöpfungsketten innerhalb der Automobilproduktion miteinander vernetzt, eine Datensouveränität über die eigenen Daten sicherstellt, eine beschleunigte Digitalisierung der Abläufe auch für klein- und mittelständige Firmen ermöglicht und die Kooperation und Zusammenarbeit von Marktteilnehmer und Wettbewerber fördert [20]. Die im Aufbau befindliche Initiative *Manufacturing-X* baut auf dem Vorbild von *Catena-X* auf und hat das Ziel die Ansätze aus *Catena-X* auf weitere Industriezweige (Maschinenbau, Chemie & Pharma, Lebensmittel, Elektro, usw.) zu übertragen [21]. Insbesondere für die Nutzung des Digitalen Zwillings im Sinne der Kreislaufwirtschaft stellen solche Plattformen wichtige Voraussetzungen dar. Sie schaffen bei allen Beteiligten die notwendige Datentransparenz für die Bewertung des ökologischen Fußabdruckes des Produktes auch lebenszyklusübergreifend. Dies deckt sich mit den Anforderungen für die zuvor genannten Ansätze zur Nachhaltigkeit, vgl. Abbildung 5 unten links.

Die vierte Voraussetzung beschreibt die Nutzerperspektive des digitalen Zwillings und thematisiert die eigentliche Analyse- und Prognosefähigkeit durch die Nutzung des digitalen Zwillings. Für produzierende Unternehmen sind dabei insbesondere die Ansätze zur qualitätsgeregelten Fertigung gemäß dem Ziel „*First Part Right*“ sowie die digitale Unterstützung des Anlaufprozesses („*Digital Ramp-up*“) von hoher Relevanz. Ebenso können auf Basis verbesserter Prognosen weitere Einsatzfelder und Geschäftsmodelle für die Produkte erdacht werden. Dies bildet die Voraussetzung für den Ansatz in Abbildung 5 oben links.

Das Prognosefähigkeit im Sinne des *First Part Right* wird insbesondere anhand der Verknüpfung von physikalischen Modellen mit sensorischen Messdaten aus dem Prozess bzw. aus der Prozesskette im digitalen Zwilling ermöglicht. Auf Basis der Informationen ist ein regelnder Eingriff in den Prozess möglich, sollte die gewünschte Qualität für den Fertigungsschritt nicht erzielt werden können. Ebenso können historischen Daten von zuvor hergestellten Bauteilen dazu genutzt werden, um die Qualität der physikalischen Modelle zu erhöhen und somit die Vorhersagegüte der Qualitätsvorhersage zu steigern.

Das Vorgehen zur digitalen Unterstützung des Anlaufprozesses stellt insbesondere zukünftig einen starken Wettbewerbsvorteil bei einer erfolgreichen Umsetzung für die Produktion nachhaltiger Produkte dar. Dieser Ansatz ermöglicht eine deutliche Beschleunigung des Anlaufprozesses einer Serienfertigung bei gleichzeitiger Kostenreduktion. Ausschlaggebend für die Kostenreduktion ist die mögliche Reduktion von experimentellen Untersuchungen und Absicherungsversuchen. Die Anzahl der notwendigen Experimente kann auf Basis von umfangreichen simulativen Studien mit dem digitalen Zwilling reduziert und auf wesentliche Experimente zur Verifikation der Ansätze und zur Darlegung

der wichtigsten Einflussfaktoren reduziert werden. Gerade diese kosten- und zeitreduzierenden Maßnahmen ermöglichen eine schnelle Bereitstellung von Fertigungskapazitäten für neue Produkte und eine schnelle Reaktionsfähigkeit bei geänderten Produkten.

2.3 Aktuelle Herausforderungen für die Umsetzung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Ansätze zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in produzierenden Unternehmen vorgestellt und der digitale Zwilling als Befähiger für die erfolgreiche Implementierung dieser Ansätze identifiziert. Im Folgenden werden die Herausforderungen diskutiert, welche aktuell eine Umsetzung der genannten Ansätze für die Kreislaufwirtschaft erschweren.

Eine Übersicht über bestehende Herausforderungen wird in Abbildung 7 gegeben. Aus der Literatur und aus Diskussion mit der Industrie lassen sich diese Herausforderungen in sechs Schwerpunkte aufteilen.

Abbildung 7: Aktuelle Herausforderungen für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in produzierenden Unternehmen

Die erste Herausforderung stellt die Schwierigkeit in der Umsetzung des digitalen Zwillings dar. Wesentliche Probleme ergeben sich für die produzierenden Unternehmen dabei in der strukturierten Aufnahme von Daten. Insbesondere gilt dies für Fertigungsfirmen, welche über einen sehr heterogenen Maschinenpark verfügen. Hier stehen aktuell noch keine vollständig standarisierten Schnittstellen und Datenformate zur Verfügung, welche eine allgemeingültige Definition der relevanten Daten ermöglichen würden. Anstatt dessen besitzt jede Maschine unterschiedliche Formate zum Im- und Export und unterschiedliche spezifische Definitionen von Prozesskenngrößen oder Achskonfigurationen. Dadurch wird die Umsetzung der Digitalisierung erschwert und Bedarf eines sehr hohen Personaleinsatzes. Gerade für klein- und mittelständige Firmen ist dieser erforderliche Personaleinsatz nicht abbildbar, da in den meisten Fällen auch adäquat qualifiziertes Personal fehlt und somit Mitarbeiter im ersten Schritt weitergebildet oder neueingestellt werden müssen.

Eine zweite Herausforderungen sind fehlende Partnerschaften und Systeme für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft [3]. Gerade für produzierende Unternehmen ohne Produktverantwortung stellt diese eine große Herausforderung dar, da keine firmenübergreifende Informationstransparenz besteht. Initiativen wie *Catena-X* haben dieses Problem

erkannt und erarbeiten geeignete Lösungsmethoden. Jedoch muss insbesondere das Vertrauen zwischen Lieferanten und Kunden in Bezug auf die Informationsteilung gestärkt und die Vorteile einer Informationsteilung in den Vordergrund gestellt und gesteigert werden.

Die dritte Herausforderung stellen die hohen Kosten für die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft dar [3]. Prozess- und Lieferketten müssen überdacht und angepasst werden, wodurch Investitionen in neue Maschinen und Anlagen getätigt werden müssen. Ebenso stellt die Verfügbarkeit von nachhaltiger Energie und nachhaltigen Rohstoffen zu geringen Kosten ein weiteres Problem dar.

Weitere Herausforderungen ist die aktuell noch geringere Akzeptanz der Endkunden für „nicht“ neue Produkte und Güter [16], die geringe öffentliche Verfügbarkeit von Nachhaltigkeitsmetriken der Unternehmen oder Produkten [3] sowie die fehlende Inzentivierung zur Umsetzung der Nachhaltigkeitsstrategien durch den Gesetzgeber [3].

3 Perspektiven für die Fertigung in einer nachhaltigen Wirtschaft

In den vorangegangenen Abschnitten wurden wesentliche Bausteine und Ansätze zur Realisierung einer Kreislaufwirtschaft diskutiert. Der digitale Zwilling wurde hierbei als wesentlicher Befähiger identifiziert, wobei immer noch eine Vielzahl von Herausforderungen die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft behindern. Im Weiteren werden Perspektiven für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft aus Sicht eines produzierenden Unternehmens anhand von Beispielen dargestellt. Diese Beispiele können in die Kategorie *Nachhaltige Produktion*, unter Nutzung der verschiedenen Nachhaltigkeitsansätze gemäß Abbildung 5, und in die Kategorie *Produktion nachhaltiger Produkte* mit neuen bzw. angepassten Fertigungsprozessen eingeteilt werden. Letztere adressieren dabei vor allem den Aspekt „digital Ramp-up“ – also die schnelle Skalierung einer nachhaltigen und vor allem wettbewerbsfähigen *Produktion nachhaltiger Produkte*. Einen Überblick gibt Abbildung 8.

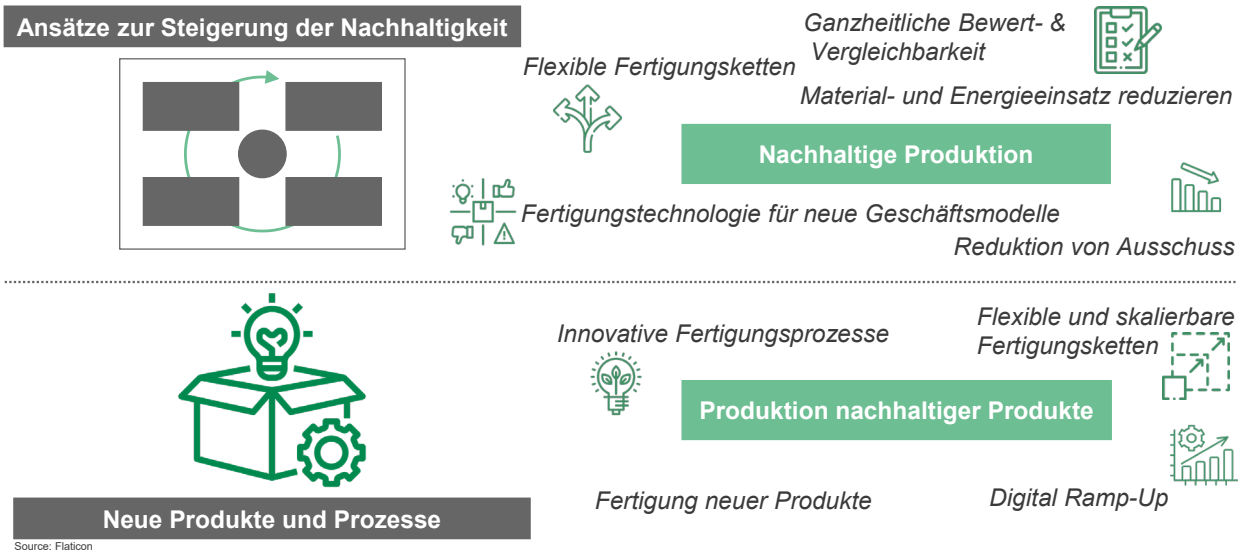


Abbildung 8: Perspektive für die Fertigung in einer nachhaltigen Wirtschaft

Die Kategorie *Nachhaltige Produktion* orientiert sich in dem vorliegenden Beitrag an den vier vorgestellten Ansätzen zur Steigerung der Nachhaltigkeit. Es werden im Folgenden drei Beispiele vorgestellt. Die Beispiele umfassen die technologische und ökologische

Betrachtung einer Prozesskette für die Zahnradfertigung sowie zwei Beispiele zu Fertigungstechnologien, welche neue Geschäftsmodelle für die R-Szenarien Repair und Remanufacture aufzeigen. Die Zuordnung zu den jeweiligen Nachhaltigkeitsansätzen für jedes Beispiel erfolgt über das Piktogramm oben links.

Die zweite Kategorie umfasst die *Produktion von nachhaltigen Produkten*. Hier stehen die wettbewerbsfähige Fertigung neuer Produkte, innovative Fertigungsprozesse, flexible und skalierbare Fertigungsketten sowie der digitale Ramp-Up im Fokus. Für diese Kategorie werden drei Beispiele vorgestellt. Die Beispiele zeigen, dass der digitale Zwilling eine notwendige Voraussetzung für die Produktion nachhaltiger Produkte ist.

Abschließend wird eine Vision zum Marktplatz für Halbzeuge präsentiert. Der Marktplatz soll die Weiternutzung von technischen Komponenten in neuen Produkten ermöglichen und vereinfachen.

3.1 Beispiele und Perspektiven für die nachhaltige Produktion

In diesem Abschnitt werden Beispiele und Perspektiven für die Kategorie *Nachhaltige Produktion* aufgegriffen. Diese Beispiele adressieren mindestens einen Nachhaltigkeitsansatz für produzierende Unternehmen, vergleich Abbildung 5.

Das erste Beispiel ist den drei Ansätzen der transparenten Fertigungsprozesse, der Betrachtung der funktionsrelevanten Eigenschaften sowie der ganzheitlichen Bewertung über dem Lebenszyklus zuzuordnen. Diese Ansätze werden am Beispiel einer Fertigung einer verzahnten Ritzelwelle für ein Getriebe aus einem elektrischen betriebenem Fahrzeug gezeigt, siehe Abbildung 9. Das Beispiel wurde an einem Demonstrator am Werkzeugmaschinenlabor WZL | RWTH Aachen University umgesetzt.

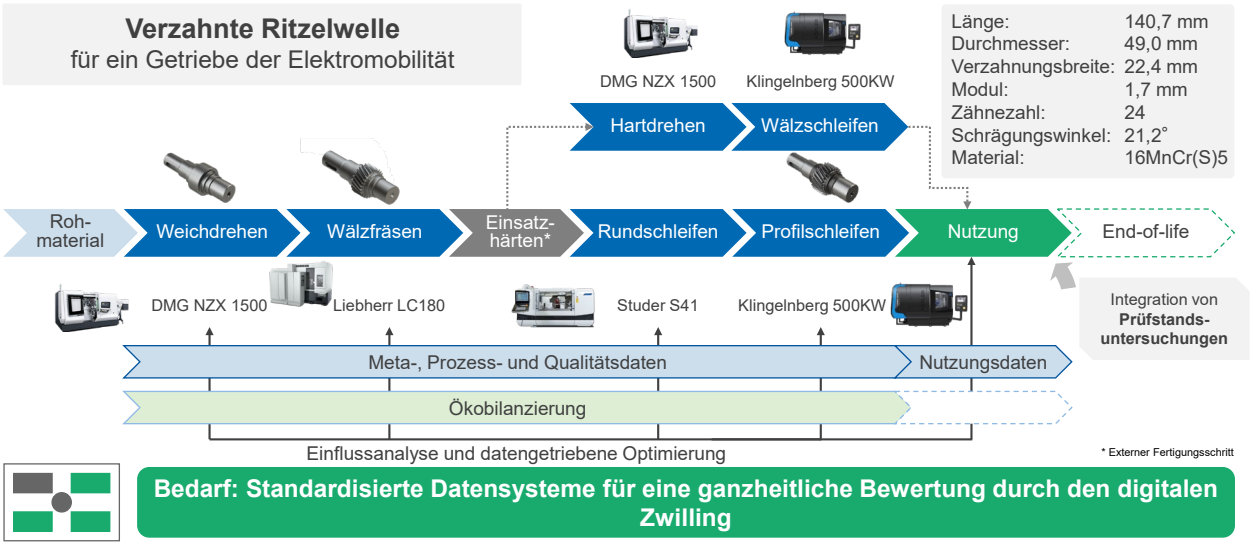


Abbildung 9: Nachhaltigkeitsbewertung von Bauteilen am Beispiel einer Verzahnung aus der Elektromobilität

Die ganzheitliche ökologische und ökonomische Bewertung eines Produktes, wie der dargestellten Ritzelwelle, bedarf eines entsprechenden digitalen Zwillings für jeden Bearbeitungsschritt des Produktes. Dieser digitale Zwilling wird aus unterschiedlichen Datenquellen gespeist und beschreibt alle relevanten Produkteigenschaften. Für die ökologische Bewertung sind dies die Daten über den aktuellen Energieverbrauch der Fertigungsmaschinen (in diesem Fall Strom) sowie über die verwendeten Stoffe (Rohmaterial, Werkzeugmaterial, Kühlschmierstoff, Druckluft, etc.). Ebenso ist interessant, wie viel Material

in welchem Fertigungsschritt zerspant wird und wie viel Energie für diesen Schritt eingesetzt werden muss. Durch diese Erhebung können Prozessschritte identifiziert werden, welche ein ungünstiges Verhältnis aus Zerspanleistung und Energieverbrauch aufweisen. Jedoch kann diese Betrachtung nicht ohne die Berücksichtigung der Bauteilqualität zur Sicherstellung der Funktion sowie der resultierenden Fertigungskosten durchgeführt werden. Eine nachhaltige Produktion der Zukunft kann daher nur als Kompromiss zwischen der erreichten Bauteilqualität, den Prozess- bzw. Produktkosten und der ökologischen Nachhaltigkeit betrachtet werden.

Für das gezeigte Beispiel der verzahnten Ritzelwelle besteht die Fertigungskette aus den folgenden Schritten:

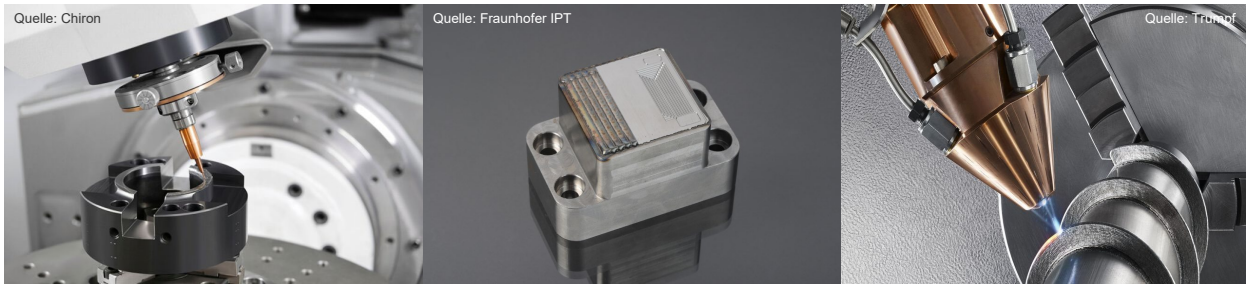
- Drehen der Außenkontur
- Weichbearbeitung der Verzahnung
- Wärmebehandlung (Einsatzhärten)
- Bearbeitung der Funktionsflächen
- Hartbearbeitung der Verzahnung

Damit der oben genannte Kompromiss näher beleuchtet werden kann, wurde ein Versuchsplan erstellt, indem die vier genannten Teilschritte in der Fertigung variiert wurden. So wurden entweder Prozessparameter geändert oder unterschiedliche Fertigungstechnologien (Profilschleifen zu Wälzschleifen miteinander verglichen. Zusätzlich wurden diese Teile auf dem Prüfstand untersucht, um eine Aussage über die Abbildbarkeit von funktionalen Eigenschaften durch unterschiedliche Prozessketten in Kombination mit dem resultierenden Einsatzverhalten zu ermitteln. Dazu wurde beispielsweise die Getriebeakustik anhand von Betriebswälzprüfungen untersucht, um eine Korrelation zwischen der Bauteilqualität und der Bauteilfunktion herzustellen. Ebenso wurde die Tragfähigkeit der Verzahnung hinsichtlich einer möglichen Korrelation untersucht. Anhand der Tragfähigkeit kann eine erwartete Lebensdauer in der späteren Nutzungsphase abgeschätzt werden. Ergebnisse aus der Analyse der Prozesskette und der Nutzungsphase zeigen, dass funktionale Eigenschaften prozessunabhängig erreicht werden können. Ebenso konnte festgestellt werden, dass eine gleichzeitige Optimierung des ökologischen Fußabdruckes nicht gleichbedeutend mit einer Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit des Prozesses ist. Weitere Auswertungen werden im Rahmen der Thementouren am WZL | RWTH Aachen University vorgestellt.

Die wesentliche Herausforderung bei der Umsetzung dieses Projektes war die Verfügbarmachung der Daten und die Erzeugung des digitalen Zwillings. Die Vielzahl von unterschiedlichen Fertigungsmaschinen und Fertigungstechnologien bildet eine heterogene Landschaft als Grundlange für die Digitalisierung. In der Umsetzung des Demonstrators ist es gelungen, die Daten zu homogenisieren und für die Nutzung im digitalen Zwilling verfügbar zu machen. Dadurch konnte die Analyse und die LCA durchgeführt werden.

Für eine zukünftige einfache Umsetzung des digitalen Zwillings bedarf es daher einheitlicher Konventionen für Datenformate und Frameworks. Bei firmenübergreifenden Produktionsketten sind ebenso einheitliche Datenökosysteme zur Sicherstellung der Informationstransparenz notwendig (bspw. Catena-X. Nur so kann gewährleistet werden, dass bestehendes Wissen in der Umsetzung von Prozess zu Prozess übertragen werden und der Aufwand für eine Implementierung eines neuen Prozesses stark reduziert werden kann. So kann sichergestellt werden, dass die funktionalen Eigenschaften und damit eine erhöhte Effizienz und Nachhaltigkeit des Produktes erzielt werden können.

Die Erreichung der funktionalen Eigenschaften ist ebenso für das folgende Beispiel relevant. Hierbei werden Fertigungstechnologien für die automatisierte Bauteilreparatur vorgestellt, siehe Abbildung 10. Dieses Beispiel ist den Ansätzen der transparenten Fertigungsprozesse, der Betrachtung der funktionsrelevanten Eigenschaften sowie der neuen Geschäftsmodelle zuzuordnen.



Fertigungstechnologien, wie

… Laser Metal Fusion (LFM)

… Laser Metal Deposition (LDM)

bieten die Möglichkeit zur Bauteilreparatur.

- Reparatur am Originalbauteil möglich
- Deutliche Reduktion des Material- und Energieeinsatzes
- Festigkeit des neuen Materials ggf. reduziert

Bedarf: Effiziente Fertigungstechnologien mit hohen Materialraten zur Reparatur

Abbildung 10: Effiziente Fertigungstechnologie für die Bauteilreparatur

Dabei können additive Fertigungstechnologien, wie das Laser Metal Fusion (LFM) oder das Laser Metal Deposition (LDM), für die Bauteilreparatur eingesetzt werden. In diesen Verfahren wird das Material, bereitgestellt als Pulver oder Draht, lokal auf der Oberfläche des zu reparierenden Bauteils mittels Laser aufgeschmolzen. Durch einen bahnen- bzw. schichtenweisen Auftrag können somit beliebige Materialdicken und Geometrieelemente auf bestehenden Werkstücken erzeugt werden.

Vorteile dieser Verfahren sind die lokale Anwendung auf dem Originalbauteil sowie die deutliche Reduktion des Material- und Energieeinsatzes im Vergleich zur Neufertigung des Bauteils. Nachteilig sind ggf. die reduzierte Festigkeit der hinzugefügten Materialschichten insbesondere bei hochbelasteten Bauteilen.

Die Herausforderungen für die Umsetzung dieser Technologien innerhalb der Kreislaufwirtschaft liegen hierbei unter anderem in der eingeschränkten Durchgängigkeit der Daten für den digitalen Zwilling. Diese Prozesse müssen in bestehende Prozessketten eingebunden werden, sodass eine effiziente Reparatur der Bauteile ermöglicht wird. Ebenso müssen die Informationen aus dem additiven Prozess in einen bestehenden digitalen Zwilling des Produktes integriert werden, sodass sichergestellt werden kann, dass die funktionalen Eigenschaften des Bauteils nach der Reparatur hinreichend genau beschrieben werden.

Aus Sicht eines produzierenden Unternehmens stellen die beiden Fertigungstechnologien einen Befähiger für die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, hier der Reparatur (Repair (R4)), dar. Dadurch kann das produzierende Unternehmen neue Märkte erschließen und gleichzeitig zur Verlängerung des EOU des Produktes beitragen.

Die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle steht ebenfalls im dritten Beispiel im Fokus, siehe Abbildung 11. Die Firma Mercedes-Benz führt eine Aufbereitung unterschiedlicher Produkte für PKW oder Nutzfahrzeuge durch und vertreibt diese Produkte anschließend unter dem Label *Mercedes-Benz Genuine Remanufactured Parts* an den Endkunden [22].

Das Beispiel ist den Ansätzen zur transparenten Fertigungsprozesse sowie der neuen Geschäftsmodelle, Szenario Remanufacture (R6), zuzuordnen.

Abbildung 11: Ersatzteile nach Maß bei Mercedes-Benz durch Remanufacturing [22]

Dabei durchlaufen die Produkte in der Regel eine Prozesskette, welche sich aus den folgenden Schritten zusammensetzt:

- Demontage
- Reinigung
- Prüfung der Bauteile
- Maschinelle Aufbereitung / Fertigung
- Montage
- Qualitätskontrolle

Nachdem die Prozesskette durchlaufen wurde, können die Produkte in das Fahrzeug eingebaut werden und sind im Sinne der Lebensdauer als gleichwertige Neuteile zu betrachten. In der Ökobilanzierung können für den hier vorliegenden Fall 215 kg CO_2 und 850 kWh Energie für die Aufbereitung eines Getriebes im Vergleich zur Neuproduktion eingespart werden.

Der oben dargestellte Prozess ist aktuell sehr von manuellen Tätigkeiten geprägt. Daher rechnet sich das Remanufacturing von Produkten wirtschaftlich aktuell nur für sehr wenige Produkte. Zukünftig müssen die benötigten Prozesse daher auch für die Einzel- und Kleinserienfertigung automatisierbar gestaltet werden können. Hier könnten Konzepte mit anlernbaren Robotern in einer Mensch-Roboter-Kollaboration, wie Cobots, oder Fortschritte in der KI-unterstützten Programmierung und Objekterkennung helfen. Ebenso sind neue Methoden notwendig, welche zerstörungsfrei eine Bewertung der unterschiedlichen Komponenten auf ihre Restlebensdauer ermöglichen. Dies könnte zum Beispiel auf Basis des digitalen Zwillings und dem Erheben weiterer Daten aus der Nutzungsphase erfolgen. Hierbei sind jedoch die sinnvolle Erhebung von Daten, die Reduzierung der zu speichernden Datenmenge und die Verfügbarmachung der Daten für externe Dritte Fragestellung, welche bisher ungeklärt sind.

An diesem Beispiel verdeutlicht sich der Übergang zwischen Lebenszyklus und Produktionszyklus gemäß Abbildung 5. Durch die Aufarbeitung von bestehenden Produkten ergeben sich neue Anforderungen für die Fertigung. Es müssen geeignete Technologien

identifiziert, die eine effiziente Aufarbeitung bei gleichzeitiger Sicherstellung der funktionalen Eigenschaften erlauben. In Zukunft können diese neuen Geschäftsmodelle daher zu innovativen neuen Fertigungstechnologien führen.

3.2 Beispiele und Perspektiven für die Produktion nachhaltiger Produkte

In diesem Abschnitt werden Beispiele und Perspektiven für die Kategorie *Produktion nachhaltiger Produkte* aufgegriffen. Anders als in Abschnitt 3.1, orientieren sich die folgenden drei Beispiele nicht an den Nachhaltigkeitsansätzen der eigentlichen Fertigung, sondern fokussieren die schnelle Verfügbarmachung innovativer und vor allem nachhaltiger Produkte. Dabei rücken die Aspekte aus den Ansätzen und insbesondere aus den Voraussetzungen für einen digitalen Zwilling in der Fertigung in den Vordergrund.

Das erste Beispiel adressiert die Entwicklung sogenannter High-Bypass-Ratio (HBR) Triebwerke, zur Senkung des Treibstoffverbrauchs und der Lärmemissionen kommerzieller Luftfahrtantriebe (siehe Abbildung 12). Für Forschungszwecke des DLR fertigte das Fraunhofer IPT einen Titan-Fan im Maßstab 1:3 in Integralbauweise zwecks Testung von Seitenwindeinflüssen auf einem speziellen Triebwerksprüfstand. Im Anschluss an das Produktdesign umfassten die wesentlichen Prozessschritte das rechnergestützte Prozessdesign, die Dreh- und Fräsbearbeitung, sowie die abschließende Qualitätssicherung.

Abbildung 12: Ressourceneffiziente Prototypenfertigung für emissionsarme Luftfahrtantriebe

Der industrielle Stand der Technik zur Fertigung derartiger Triebwerkskomponenten ist durch eine erfahrungsbasierte Prozessauslegung und hochiterative, ressourcenintensive Einfahrprozeduren gekennzeichnet. Demgegenüber erfolgte die rechnergestützte Prozessauslegung am Fraunhofer IPT vollständig virtuell auf Basis des digitalen Zwillings. Die Schwerpunkte lagen hierbei auf der Ermittlung stabiler Drehzahlen, der Abschätzung der Werkzeugstandzeit und der Einhaltung zulässiger Geometrieabweichungen der Strömungsflächen. Die erforderlichen Simulationswerkzeuge umfassten numerische und analytische Modelle, welche über entsprechende Schnittstellen mit der rechnergestützten Planungsumgebung integriert wurden. Auf diese Weise konnte der Prototyp ressourcen- und kosteneffizient nach dem Prinzip *First-Part-Right* gefertigt werden.

Auch in der eigentlichen Fertigung des Prototyps konnte der digitale Zwilling gewinnbringend eingesetzt werden. Hierbei lag der Fokus auf der hochfrequenten Erfassung von

Maschinen- und Sensordaten der Werkzeugmaschine und die darauf basierende Ermittlung der resultierenden Bauteilqualität sowie der anfallenden Ressourcenverbräuche. Hierzu kam eine Edge-Cloud-basierte Datenerfassungs- und Verarbeitungslösung zum Einsatz, die aus den erfassten Rohdaten die geometrischen Abweichungen des Bauteils sowie den Gesamtenergiebedarf und weitere Nachhaltigkeitsgrößen berechnete. So wurde eine datenbasierte Qualitätssicherung auf Basis des digitalen Zwillings realisiert und ein wesentlicher Beitrag für ein präzises Life Cycle Assessment (LCA) geleistet.

Im dargestellten Beispiel unterstützte der digitale Zwilling insbesondere die wirtschaftliche und ressourceneffiziente Fertigung des Prototyps sowie die Einhaltung der hohen Toleranzanforderungen. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal gegenüber dem industriellen Stand der Technik stellte hier insbesondere der Einsatz umfangreicher Technologiemodelle zur Simulation und Datenverarbeitung dar. Neben der weiteren Erforschung und Entwicklung der erforderlichen Internet-of-Things (IoT) Infrastruktur stellt die weitere Nutzbarmachung dieser Modelle ein wesentliches Erfolgskriterium für die Industrialisierung des digitalen Zwillings dar.

Ein weiteres Beispiel für die Nutzung des digitalen Zwillings in der Auslegung der Produktion von nachhaltigen Produkten ist in Abbildung 13 abgebildet. In diesem Beispiel handelt es sich um den digitalen Anlaufprozess, welcher analog zur Fertigung der Blisk auf der Steigerung der Analyse- und Prognosefähigkeit durch den digitalen Zwilling auf-setzt.

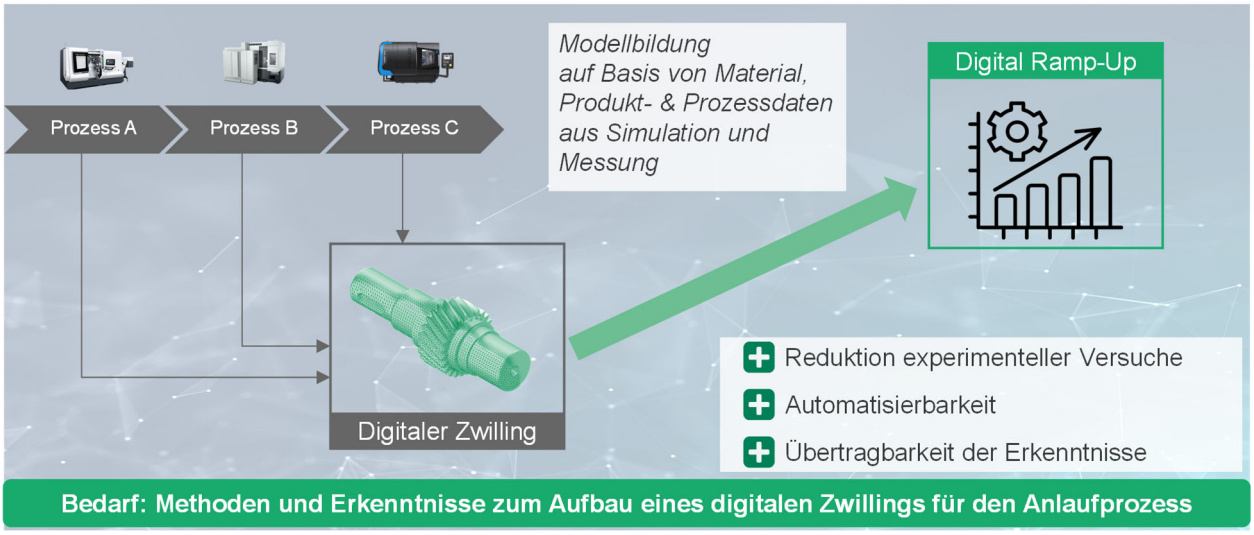


Abbildung 13: Digitaler Anlaufprozess für eine effiziente Fertigung der Zukunft (Quelle: Freepik)

Der Anlaufprozess für eine Serienfertigung stellt in der Regel einen personellen und zeitlich aufwendigen Prozess für produzierende Unternehmen dar. Hierzu sind umfangreiche experimentelle Untersuchungen an klein- mittleren Losgrößen notwendig, um die Fertigungsprozesse und die Fertigungsabläufe innerhalb der Prozesskette einzustellen. Zwischen diesen Untersuchungen finden regelmäßige Anpassungen der Prozessparameter bis hin zu konstruktiven Änderungen an Werkzeugen und Spannsystemen statt, damit die gewünschte Qualität und Taktzeit des Produktes sichergestellt werden kann. Dieser Prozess findet derzeit oftmals heuristisch auf Basis von Erfahrungswissen oder mithilfe von Prozesssimulationen statt. Da die Produktentwicklungszyklen immer kürzer werden, z.B. für neue Windenergieanlagen oder Brennstoffzellen, wird zukünftig eine flexiblere Ausrichtung der Produktion und der Fertigungsketten immer wichtiger. Daher besteht ein großes Potenzial in einem digital unterstützten Anlaufprozess. Hierbei wird der digitale

Zwilling dazu genutzt, um auf Basis von zusätzlichen Daten (Sensorik für bspw. Temperatur u. Kraft, Materialdaten) den Anlaufprozess zu beschleunigen und die notwendigen Iterationsschleifen durch analytische Datenmodelle zu reduzieren. Ziel ist es, durch den digitalen Zwilling eine automatisierbare Prädiktion der Prozessparameter zu erhalten, welche eine stabile Prozessführung unter Einhaltung der Produktanforderungen ermöglichen.

Diese Methode wird derzeit im Forschungsumfeld für einen industriellen Anlaufprozess für eine Anwendung im Bereich Umformen (Rollbonding) ertüchtigt. Beim Aufbau einer neuen Produktionslinie werden zusätzliche Sensoren zur Messung verschiedener Prozessparameter in den Maschinen verbaut. Diese aufgenommenen Prozessdaten werden zusammen mit den eingehenden Materialdaten (bspw. Blechdicke) in einem digitalen Zwilling des Bleches zusammengeführt. Durch die Analyse der Prozessdaten, der Materialdaten und der erzeugten Bauteilqualität können Korrelationen zwischen den unterschiedlichen Parametern festgestellt und über entsprechende Modelle zur Regelung des Prozesses verwendet werden. Dadurch kann eine modellbasierte Automatisierung des Anlaufprozesses für das Rollbonding geschaffen werden. Die Erkenntnisse können dann auf den Serienbetrieb überführt werden und dort zur Prozessregelung verwendet werden.

Die wesentliche Herausforderung neben der Erstellung des digitalen Zwillings stellt dabei die methodische Strukturierung des digitalen Anlaufprozesses dar. Es gilt herauszufinden, welche Sensoren und messbaren Parameter notwendig sind, um Korrelationen zwischen der Bauteilqualität und der Prozessführung zu ermitteln, vgl. Ansätze zu funktionsrelevanten Eigenschaften. Ebenso müssen Methoden geschaffen werden, welche eine Mehrzieloptimierung der Prozesskette erlauben. Hierbei gilt es zusätzlich den Zielkonflikt aus Produktfunktion, -kosten und Nachhaltigkeit zu lösen. Sollte eine erfolgreiche Implementierung vorliegen, ist es im nächsten Schritt erforderlich diese bestmöglich zu automatisieren.

Ein weiteres Beispiel für neue innovative nachhaltige Produkte ist in Abbildung 14 aufgeführt. In dem hier aufgeführten Beispiel handelt es sich um eine funktionsintegrierte Entwicklung und Produktion einer wasserstoffbetriebenen Gasturbine.

Abbildung 14: Funktionsintegrierte Entwicklung und Produktion von nachhaltigen Produkten

Hierfür wurde am Fraunhofer IPT zusammen mit der Firma Kawasaki eine Brennkammer für die Verbrennung von Wasserstoff zur Energiegewinnung entwickelt. Dabei wurden die Anforderungen an die Brennkammer und die dafür notwendigen Funktionen in Zusammenspiel mit der Fertigbarkeit direkt bei der Bauteilauslegung berücksichtigt. So konnte

mittels des bekannten Ansatzes mit Design for Additive Manufacturing (DfAM) eine funktionsoptimierte Innen- und Außenstruktur des Bauteils für den LPBF-Prozess realisiert werden. Dadurch konnte eine 100 % Materialausnutzung für das Bauteil erzielt werden.

Als Bedarf für die Zukunft ist hier die weitere Verschmelzung von Entwicklung und Produktion zu sehen. Insbesondere für die Herstellung derartig innovativer und vor allem nachhaltige Produkte ist die Berücksichtigung der Fertigung und insbesondere auch der Upgradebarkeit und Wiederaufbereitung in der Entwicklungsphase von immanenter Wichtigkeit. Ohne ein geeignetes Produktdesign können geeignete Fertigungstechnologien zur Verlängerung der Lebensdauer oftmals nur unwirtschaftlich eingesetzt werden.

3.3 Vision

Die Vision für einen Marktplatz für ausgediente Komponenten in Form von Halbzeugen ist in Abbildung 15 dargestellt. Dabei soll der Produktwert eines beliebigen technischen Produktes bestmöglich erhalten oder gegebenenfalls gesteigert werden. Dies kann innerhalb eines bestehenden Produktlebenszyklus aber auch außerhalb des Unternehmens in einem anderen, neuen Produktlebenszyklus erfolgen. Insbesondere die Weiterverwen-dung von Subkomponenten als Halbzeuge für neue Produkte stellt dabei einen wesentlichen Faktor für die Steigerung der Nachhaltigkeit der Industrie aufgrund der Skalenef-fekte dar. So können beispielsweis energieintensive Wärmbehandlungsrouten für die Er-zeugung neuwertiger Halbzeuge substituiert werden. Dabei wird insbesondere die Ver-fügbarkeit der relevanten Zustandsdaten der Halbzeuge über den digitalen Zwilling eine wesentliche Voraussetzung sein.

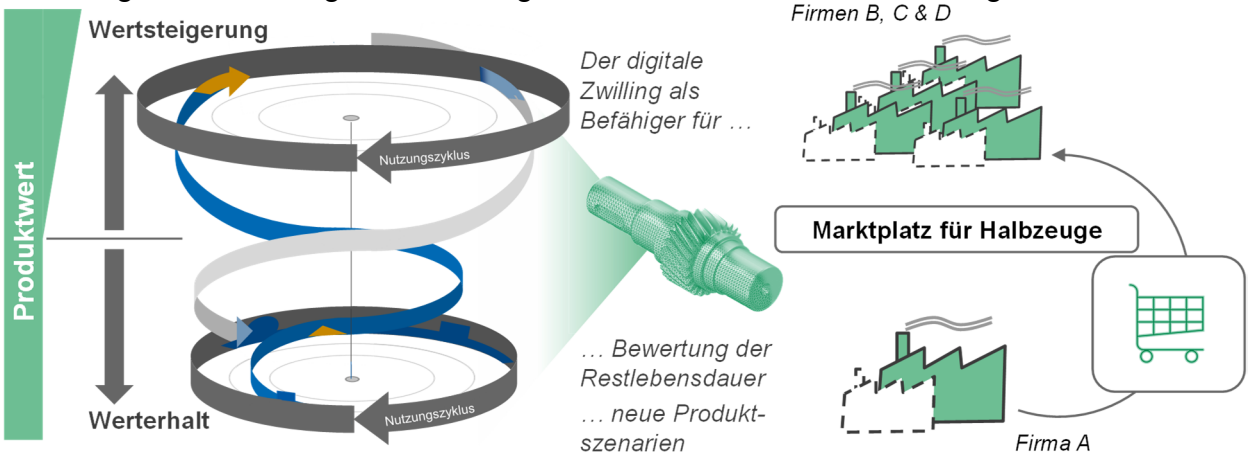


Abbildung 15: Halbzeuge als Ausgangsmaterial für nachhaltige neue Produkte

Damit eine Möglichkeit zur Weiterverwendung von Subkomponenten geschaffen werden kann, ist bspw. ein Marktplatz (Plattform) zur Verfügbarmachung dieser Komponenten zu schaffen, siehe Abbildung rechts. Dabei stellt wiederrum der digitale Zwilling der Subkomponente eine wesentliche Befähigung für diesen Marktplatz dar. Denn für eine sinnvolle Verwendung von Subkomponenten bzw. Halbzeugen ist eine Kenntnis über die Restlebensdauer bzw. der Belastungen während des Lebenszyklus wichtig. Insbesondere für hochbelastete Komponenten, wie Verzahnungen, Antriebswellen oder Lager, müssen die Informationen über den Ermüdungszustand des Materials bekannt sein. Basierend auf dieser Zustandsbeschreibung kann über eine Weiterverwendung als Halbzeug für neue Produkte entschieden werden. Denkbar wäre hier auch eine Klassifizierung der Halbzeuge auf Basis des angedachten Einsatzzweckes. Beispielsweise wären die

Anforderungen der Halbzeuge für niedrigere zukünftige Belastungen geringer, sodass eine größere Menge an Halbzeugen berücksichtigt werden können.

Dieser Marktplatz setzt das Vorhandensein von Modellen zur Abschätzung des Ermüdungszustandes des Materials bzw. der Restlebensdauer voraus. Erste Ansätze für eine Abschätzung der Restlebensdauer gibt es bereits in der Literatur. Jedoch sind diese Ansätze sehr spezialisiert auf bestimmte Arten von Komponenten. Ansätze, welche eine allgemeinere Formulierung der Restlebensdauer ermöglichen, sind daher zukünftig zu erforschen. Ebenso sind Messmethoden zur Materialcharakterisierung dahingehend weiterzuentwickeln, sodass, möglichst zerstörungsfrei, eine Abschätzung über den Schädigungszustand des Materials erhoben werden kann. Drittens ist der digitale Zwilling für ein Bauteil so zu strukturieren, dass nur die notwendigen Daten für die Bewertung der Restlebensdauer entlang des Lebenszyklus der Komponente sowie der aktuellen geometrischen Gestalt gespeichert werden. Sollten diese Ansätze in der Zukunft verfügbar sein, könnte ein neuer Industriezweig erschlossen werden, welcher den sekundären Markt für Subkomponenten erschließt und die Nachhaltigkeit unserer Industrie massiv steigert.

4 Zusammenfassung

Die Steigerung der Nachhaltigkeit unserer Produkte und unserer Industrie stellt das Ziel für die kommenden Jahre und Jahrzehnte dar. Die Literatur zeigt auf, dass die Kreislaufwirtschaft und insbesondere die Umsetzung der R-Szenarien, Methoden und Techniken bereitstellen um dieses Ziel zu erreichen. Für die erfolgreiche Umsetzung der Nachhaltigkeit wurden vier Ansätze für produzierende Unternehmen herausgearbeitet. Aus Sicht von produzierenden Unternehmen ergeben sich dabei im Wesentlichen zwei Betätigungsfelder die sich an den vier Ansätzen orientieren. Zum einen steht die Schaffung nachhaltiger Produkte. Zum anderen ist die Produktion von nachhaltigen Produkten zu nennen. Als wichtiger Befähiger für die erfolgreiche Umsetzung dieser beiden Betätigungsfelder ist der digitale Zwilling zu nennen. Denn nur mit der Verfügbarkeit von produktindividuellen Daten können Entscheidungen getroffen und Analysen durchgeführt werden, welche uns zu einer nachhaltigeren Produktion und zur Produktion von nachhaltigen Produkten bringen. Die Betätigungsfelder haben einige Herausforderungen gemein, welche eine aktuelle Umsetzung erschweren. So sind die oftmals fehlende Digitalisierung und Verfügbarkeit des digitalen Zwillings, der hohe erforderliche wirtschaftliche Aufwand, die fehlende Kundenakzeptanz für aufbereitete Produkte und die fehlenden regulativen Randbedingungen als Beispiele zu nennen.

In diesem Vortrag werden unterschiedliche Beispiele aus den beiden Betätigungsfeldern genannt. Für die Beispiele wird deutlich, dass die Wissenschaft neue und bessere Modelle zur Bestimmung der Restlebensdauer der Komponenten zukünftig erarbeiten muss. Ebenso wird deutlich, dass die Verfügbarkeit des digitalen Zwillings deutlich gesteigert werden muss. Auf der anderen Seite sind neue Fertigungstechnologien und Produktionsabläufe zu entwickeln, welche eine effiziente Bearbeitung von Einzel- und Kleinserien ermöglicht. Ebenso sind neue Produktinnovationen zu fokussieren, welche durch eine direkte Kopplung aus Entwicklung, Produktion und Nutzung Produkte konzipieren, die eine Werthaltungs- oder Wertsteigerungsstrategie nach Erreichen der initialen Lebensdauer bereits enthalten.

Für die nächsten Jahre und Jahrzehnte ist daher der enge Diskurs zwischen Forschung und Industrie sehr wichtig. Nur so können wir die zahlreichen Herausforderungen angehen und Lösungsansätze finden und umsetzen.

5 Literatur

[1] United Nations. „UN Sustainable Development Goals.” un.org. https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/ (Zugriff am: 21. Feb. 2023).

[2] Europäischer Rat und Rat der Europäischen Union. „Ein europäischer Grüner Deal.” consilium.europa.eu. https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/ (Zugriff am: 21. Feb. 2023).

[3] M. M. Bjørnbet, C. Skaar, A. M. Fet und K. Ø. Schulte, „Circular economy in manufacturing companies: A review of case study literature,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 294, Art.-Nr. 126268, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126268.

[4] J. Kirchherr, D. Reike und M. Hekkert, „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions,“ *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 127, S. 221–232, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

[5] P. Schroeder, K. Anggraeni und U. Weber, „The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals,“ *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 23, Nr. 1, S. 77–95, 2019, doi: 10.1111/jiec.12732.

[6] M. Eigner und R. Stelzer, *Product Lifecycle Management* (VDI-Buch). 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.

[7] J. Stark, *Product Lifecycle Management (Volume 1): 21st Century Paradigm for Product Realisation* (Decision Engineering). 4. Aufl. Cham: Springer, 2020.

[8] P. Wang, S. Kara und M. Z. Hauschild, „Role of manufacturing towards achieving circular economy: The steel case,“ *CIRP Annals*, Jg. 67, Nr. 1, S. 21–24, 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.049.

[9] N. Z. Nasr *et al.* „Re-defining Value: The Manufacturing Revolution: Remanufacturing, Refurbishment, Repair and Direct Reuse in the Circular Economy.” resourcepanel.org. https://www.resourcepanel.org/file/1105/download?token=LPqPM9Bo (Zugriff am: 21. Feb. 2023.

[10] F. Blomsma *et al.,* „Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 241, Art.-Nr. 118271, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118271.

[11] A. M. King, S. C. Burgess, W. Ijomah und C. A. McMahon, „Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle?,“ *Sustainable Development*, Jg. 14, Nr. 4, S. 257–267, 2006, doi: 10.1002/sd.271.

[12] „Richtlinie 2008/98/DE des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien,” Europäische Union, Straßburg, 2008. Zugriff am: 22. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN

[13] S. Sihvonen und T. Ritola, „Conceptualizing ReX for Aggregating End-of-life Strategies in Product Development,“ *Procedia CIRP*, Jg. 29, S. 639–644, 2015. doi: 10.1016/j.procir.2015.01.026.

[14] J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell und A. Hanemaaijer. „Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain: Policy Report.“ pbl.nl. https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[15] World Resource Institute. „Greenhouse Gas Protocol (GHG).” ghgprotocol.org. https://ghgprotocol.org/ (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[16] D. Brissaud und P. Zwolinski, „The Scientific Challenges for a Sustainable Consumption and Production Scenario: The Circular Reuse of Materials for the Upgrading and Repurposing of Components,“ *Procedia CIRP*, Jg. 61, S. 663–666, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.148.

[17] T. Bergs *et al.,* „Nachhaltige Produktion mit dem Digitalen Zwilling,“ in *Internet of Production – Turning Data into Sustainability: AWK‘21*, 2021, S. 119–150.

[18] *ISO 23247-1:2021, Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles*, 23247-1:2021, International Organisation for Standardization, 2021.

[19] *VDI/VDE 2610, Exchange format for gear data - Gear Data Exchange Format (GDE Format) - Definition*, 2610, Verein deutscher Ingenieure, 2021.

[20] Catena-X Automotive Network. „Die Vision von Catena-X.” catena-x.net. https://catena-x.net/de/vision-ziele (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[21] Bundesminsterium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). „Manufacturing-X: Initiative zur Digitalisierung der Lieferketten in der Industrie.“ plattform-i40.de. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Manufacturing-X.pdf ?__blob=publicationFile&v=14 (Zugriff am: 28. Feb. 2023).

[22] Mercedes-Benz. „Mercedes-Benz B”B Connect.” b2bconnect.mercedes-benz.com. https://b2bconnect.mercedes-benz.com/de#home (Zugriff am: 28. Feb. 2023).

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 2.1:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen

Dr.-Ing. Jens Brimmers, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

2.2 Energie- und Ressourceneffizienz in der Fertigung

T. Bergs, S. Barth, A. Beckers, A. Dehmer, G. Grünert, A. Koch, S. Prinz, J. Röttger, L. Stauder

Gliederung

1 Motivation und Herausforderungen in der Praxis 153

2 Die Fertigung als Befähiger für die Steigerung der ökologischen Produktnachhaltigkeit 155

3 *„You can't manage what you don't measure"* - Grundlagen der Ökobilanzierung 158

4 Best-Practice – Beispiele zur Effizienzsteigerung in der Fertigung 162

4.1 Fertigungsprozessbezogene Schaffung von Transparenz und Ableitung von kurzfristig realisierbaren Maßnahmen 162

4.2 Steigerung der Effizienz von Maschinen 165

4.3 Steigerung der Effizienz der Maschinenperipherie am Beispiel der Kühlschmierstoffzufuhr und -aufbereitung 167

5 Funktionsverlängerung durch Prozessoptimierung in der Fertigung 169

6 Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft 173

6.1 Materialeffizienz durch Prozessinnovation 173

6.2 Materialeffizienz durch Materialoptimierung für Recycling und Kreislaufwirtschaft 175

7 Produktspezifische Optimierung der Produktlebenszyklen mit Hilfe der Fertigung und des Digitalen Zwillings 177

8 Zusammenfassung und Ausblick 179

9 Literatur 180

 doi: 10.24406/publica-962

Kurzfassung

Energie- und Ressourceneffizienz in der Fertigung

Die Vereinbarkeit von ökonomischer und ökologischer Nachhaltigkeit bestimmt zunehmend die Strategien fertigender Unternehmen. Im Fokus der ökologischen Nachhaltigkeit stehen vor allem die Energie- sowie die Materialeffizienz in der eigenen Produktion. Viele Möglichkeiten zur Senkung des Energiebedarfs und zur Erhöhung der Materialeffizienz in der eigenen Fertigung bleiben jedoch bisher ungenutzt. Unternehmen, die hier bereits die Initiative ergriffen haben, konnten bereits kurzfristig Potentiale zur Energieeinsparung heben und Wertstoffe und Materialien erstmals in Wertstoffkreisläufen führen. Mittel- bis langfristig werden für eine Wirtschaft in einer nachhaltigen Gesellschaft darüber hinaus zunehmend unternehmensübergreifende Aktivitäten initiiert und wirksam werden müssen. Dies erfordert eine enge, produktspezifische Kooperation von allen Beteiligten entlang der jeweiligen Wertschöpfungsketten sowie die Entwicklung und schnelle Umsetzung neuer und innovativer Nachhaltigkeitsansätze. Daher wurden im vorliegenden Beitrag aktuelle Best-Practices zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz in der Fertigung vorgestellt, die in enger Diskussion mit OEMs, Komponenten- und Maschinenherstellern, Betriebsmittellieferanten sowie Herstellern von Sensor- und Monitoringsystemen identifiziert wurden. Mit einem Blick auf die Potentiale aber auch Herausforderungen von Morgen sowie die zukünftigen Herausforderungen werden weiterhin vielversprechende Möglichkeiten und Beispiele zur Realisierung der dringend benötigten Kreislaufwirtschaft unter Berücksichtigung unterschiedlicher R-Szenarien auf Basis des Digitalen Zwillings von Produkt und Fertigung beleuchtet.

Schlagwörter: Energie, Ressourcen, Fertigung, Effizienz, Produktlebenszyklus

Abstract

Energy and Resource Efficiency in Manufacturing

The compatibility of economic and ecological sustainability is increasingly determining the strategies of manufacturing companies. The focus of ecological sustainability is primarily on energy and material efficiency in the company's own production. However, many possibilities that could already be used in the company's own production to reduce energy consumption and increase material efficiency remain unused. In the medium to long term, for an economy in a sustainable society, moreover, cross-company activities will increasingly have to be initiated and become effective. This requires close, product-specific cooperation from all participants along the respective value chains as well as the development and implementation of new sustainability approaches. Therefore, this paper presents current best practices for increasing energy and material efficiency in manufacturing. With a view to the potentials of tomorrow as well as the future challenges, promising possibilities and examples for realising the urgently needed circular economy will continue to be highlighted, taking into account different R-cycles based on the digital twin of product and manufacturing.

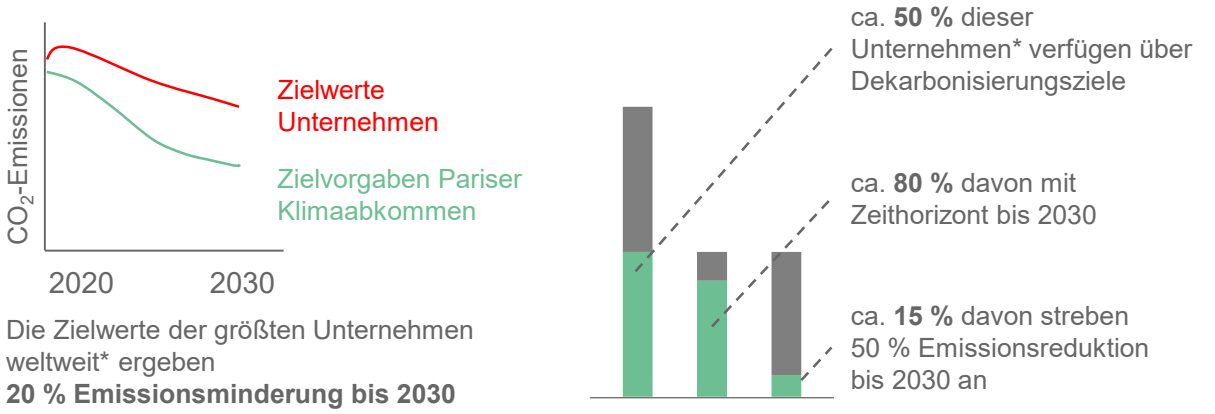
Keywords: energy, resources, manufacturing, efficiency, product lifecycle

1 Motivation und Herausforderungen in der Praxis

Kaum ein Thema bewegt Gesellschaft und Wirtschaft in den vergangenen Jahren so sehr wie das Thema der Nachhaltigkeit. Sowohl gesellschaftlich als auch politisch wächst das Bestreben wirkungsvolle Maßnahmen zum Schutz unserer Umwelt zu ergreifen. Hierbei spielt die Industrie eine Schlüsselrolle. Der gesamte deutsche Industriesektor war im Jahr 2021 mit 181 Mio. Tonnen CO_2-eq der zweitgrößte Verursacher von Treibhausgasemissionen nach der Energiewirtschaft (247 Mio. Tonnen CO_2-eq) [1]. Damit rückt die Industrie auf der Suche nach **Einsparpotentialen** in den Fokus, welche zunehmend durch Wirtschaft und Politik forciert werden.

Auf Basis einer wachsenden Zahl von Klimaschutzgesetzen, wie beispielsweise dem Pariser Klimaabkommen und dem deutschen Klimaschutzgesetz werden auch fertigende Unternehmen zunehmend verpflichtet, ihre Treibhausgasemissionen zu reduzieren und erneuerbare Energien als Basis für ihr Handeln einzusetzen. Gemäß den Zielvorgaben des Pariser Klimaabkommens sollen die Treibhausgasemissionen gegenüber dem Stand von 2019 bis 2030 um 43 % und bis 2040 um 84 % verringert werden [2]. Dennoch haben Analysen der Unternehmensberatung Roland Berger ergeben, dass sich bisher nur rund 10 - 15 % aller großen Unternehmen dazu verpflichtet haben, bis 2030 eine Gesamtemissionsminderung um 50 % anzustreben. Berechnungen ergeben vielmehr, dass sich, wenn man alle Zielwerte der größten börsennotierten Unternehmen in den wichtigsten Industriestaaten addiert, eine Verringerung des CO_2-Ausstoßes von lediglich 20 % bis 2030 ergibt, wie in Abbildung 1 ersichtlich ist. [3] Diese liegt deutlich unter den erforderlichen 43 %. Jeder Marktakteur muss seine Anstrengungen also signifikant erhöhen, um das Pariser Klimaziel noch zu erreichen. Weiterhin stellt Roland Berger fest, dass aktuell nur 50 % der großen Unternehmen weltweit aktuell über **Dekarbonisierungsziele** verfügen. Der Betrachtungsrahmen wurde dabei auf Basis der 4.700 Unternehmen mit größter Marktkapitalisierung, den 166 größten CO_2-Emittenten und den 2.000 weltweit größten börsennotierten Unternehmen nach Umsatz gesetzt. Diese liegen jedoch nur zu 80 % im Zeithorizont bis 2030. 15 % der Unternehmen verfügen dabei über Zielwerte für 50 % Emissionsreduktion bis 2030.[3] Zusammenfassend müssen die Unternehmen in Zukunft sehr viel konsequenter CO_2 einsparen als bislang, wenn die Pariser Klimaziele erreicht werden sollen.

In Deutschland gilt, im deutschen Handelsgesetzbuch (HGB) verankert, bereits für große kapitalmarktorientierte Unternehmen sowie Kreditinstitute und Versicherungen mit mehr als 500 Mitarbeitern außerdem die Pflicht, Nachhaltigkeitsberichte zu veröffentlichen, in denen über die ökologischen und sozialen Auswirkungen des Unternehmens auf seine Umwelt berichtet wird. Der Bericht muss Informationen zu Umwelt-, Sozial- und Arbeitsbelangen sowie zur Achtung der Menschenrechte und zur Korruptionsbekämpfung enthalten. Die Berichtspflicht gilt in Deutschland seit dem Geschäftsjahr 2017 und wurde im Jahr 2021 im Rahmen einer Reform des HGB erweitert und verschärft. Unternehmen müssen hierbei ihren Ressourcen- und Energieverbrauch sowie ihre Treibhausgasemissionen und ihre Strategien zur Senkung dieser Faktoren offenlegen. Außerdem sind Strategien zur **Anpassung an den Klimawandel, Energieeffizienzmaßnahmen und Recyclingaktivitäten** darzustellen sowie die Lieferkette und deren Zusammenspiel mit den eigenen Nachhaltigkeitszielen nachzuweisen. [4]



*auf Basis der 4.700 Unternehmen mit größter Marktkapitalisierung, den 166 größten CO_2-Emittenten und den 2.000 weltweit größten börsennotierten Unternehmen nach Umsatz

Abbildung 1: Die Zielwerte der Emissionsreduktion der großen Unternehmen reichen nicht aus, um die Ziele des Pariser Klimaabkommen zu erreichen [3]

Dabei stehen Unternehmen vor der Schwierigkeit, alle notwendigen Daten und Informationen für eine umfassende Berichterstattung zu sammeln und bereitzustellen. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen verfügen oft über begrenzte Ressourcen und Expertise in diesem Bereich. Der zunehmende Druck hin zur Berichterstattung und letztendlich hin zur Nachhaltigkeit wird in vielen Branchen zusätzlich vonseiten der Kunden sowohl im B2B als auch im B2C Geschäft flankiert. In der Automobilbranche beispielsweise werden ESG-Ratings (Environment, Social and Governance) für Zulieferer zunehmend Pflicht. OEMs verlangen zunehmend Nachhaltigkeitsberichte von ihren Zulieferern, da die Emissionen in der Nachhaltigkeitsbilanz von OEMs typischerweise zu über 90% im Scope 3 liegen (siehe Abbildung 2). Auch Investoren und Kunden setzen zunehmend auf ESG-Informationen, um Entscheidungen zu treffen und ihr Engagement für nachhaltige Unternehmen zu stärken. Somit besteht ein Wettbewerbsvorteil für Zulieferer, die ESG-Informationen auf freiwilliger Basis veröffentlichen, auf die ESG-Anforderungen ihrer Kunden reagieren und sich dadurch gegenüber ihren Stakeholdern transparenter darstellen. [5]

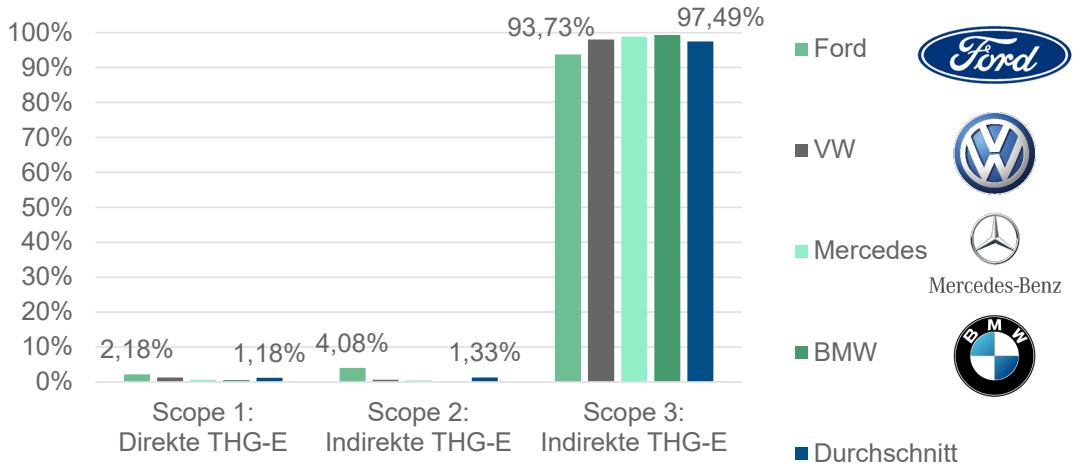


Abbildung 2: Die Emissionen der Automobilhersteller liegen zu über 90 % im Scope 3 [6]

Scope 1, 2 und 3 Emissionen sind Kategorien, die von der Greenhouse Gas Protocol Initiative definiert wurden, um die Treibhausgasemissionen von Unternehmen zu klassifizieren und zu messen. Scope 1-Emissionen sind direkte Treibhausgasemissionen, die durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen oder durch Prozesse innerhalb des Unternehmens entstehen, z. B. die Emissionen von Heizungen oder Maschinen. Scope 2-Emissionen sind indirekte Treibhausgasemissionen, die durch den Kauf von beispielsweise Elektrizität, Dampf oder Kälte entstehen. Scope 3-Emissionen sind alle anderen indirekten Emissionen, die durch die Aktivitäten von Unternehmen entstehen, jedoch außerhalb der Grenzen des Unternehmens liegen. Dies umfasst Emissionen, die durch die Herstellung von Rohstoffen, die Produktion von (Vor-)produkten, die Nutzung von Produkten durch Kunden, die Entsorgung von Abfallprodukten und die Nutzung von Transportmitteln entstehen, also indirekte Treibhausgasemissionen entlang der vor- sowie nachgelagerten Lieferkette. Hierunter fallen auch die Aktivitäten jeglicher Zulieferer. Da die OEMs von der Nachhaltigkeitsberichtpflicht betroffen sind, benötigen sie dementsprechend Nachhaltigkeitsdaten Ihrer Zulieferer und machen die Lieferung dieser zunehmend zur Bedingung einer Geschäftsbeziehung.

Produzierenden Unternehmen stehen vor der Herausforderung, den ökologischen Nachhaltigkeitsanforderungen gerecht zu werden, ohne die ökonomischen Gesichtspunkte aus dem Blick zu verlieren. Aufgrund der **hohen Produkt- und Anlagendiversität** gibt es kein Patentrezept zur Umsetzung von Nachhaltigkeit in fertigenden Unternehmen, was oftmals zu einem unstetigen Einstieg in das Thema der Nachhaltigkeitsbilanzierung und –steigerung führt. Für den vorliegenden Beitrag wurden daher gemeinsam mit praktizierenden Unternehmen **aktuelle Best-Practice Ansätze** zur kurzfristigen Umsetzung im Unternehmen erarbeitet. Weiterhin wird ein übersichtliches Rahmenwerk für die lebenszyklusübergreifende Betrachtung der Nachhaltigkeit von gefertigten Produkten eingeführt. Abschließend erfolgt ein Ausblick in die zukünftigen Chancen und Herausforderungen auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Fertigung.

2 Die Fertigung als Befähiger für die Steigerung der ökologischen Produktnachhaltigkeit

Wo die relevanten Hebel zur Steigerung der Nachhaltigkeit und zur Realisierung von Einsparungspotentialen liegen, ist unternehmensindividuell und stark abhängig vom Produkt.

Es kann unterschieden werden, in welchem Maße bei der Fertigung oder in der Nutzungsphase des Produkts Umweltwirkungen entstehen. Dies lässt sich anhand der drei in Abbildung 3 abgebildeten Beispielprodukte verdeutlichen.

Abbildung 3: Individuelle Umweltwirkungen dargestellt an Beispielprodukten der Expertengruppe

Der akustische Absorber der Fa. Carcoustics für den Automobilbereich aus Kunststoff verbraucht bei der Produktion Energie und Material. In der Nutzungsphase selbst verursacht er weder aktiv Emissionen noch hat er einen Einfluss auf die Lebensdauer des Autos. Lediglich durch sein Gewicht beeinflusst der Absorber die Höhe der CO_2-Emissionen des Autos. Je nach Auslegung des Absorbers beträgt der Gewichtsunterschied jedoch nur wenige Gramm, was vor dem Hintergrund der gesamten CO_2-Emissionen eines Autos in der Nutzungsphase vernachlässigbar ist. Das zweite Produkt, eine beschichtete Schraube der Unternehmensgruppe B+T, wurde galvanisiert, was zunächst erhöhte Umweltwirkungen in der Produktion gegenüber einer nicht galvanisierten Schraube bedeutet. Durch die Beschichtung hält das mit Hilfe der Schraube zusammengehaltene Endprodukt potentiell länger als bei Verwendung von Schrauben ohne Beschichtung. Die Lebensdauer der Schraube wirkt sich oftmals direkt auf die Lebensdauer des Endprodukts aus, da der Endverbraucher das Produkt beim Lösen der Schraube gegebenenfalls austauscht. Führt also die Verwendung der galvanisierten Schrauben dazu, dass weniger neue Endprodukte produziert werden müssen, werden alle damit verbundenen Aufwände eingespart. In der Gesamtbilanz kann der vermehrte Ressourceneinsatz in der Fertigung der Schraube durch das Galvanisieren von den Einsparungen über den verlängerten Produktlebenszyklus überwogen werden. Produkte wie der in Abbildung 3 dargestellte Schiffsmotor der Fa. MAN Energy Solutions erzeugen hingegen in der Nutzungsphase einen Großteil ihrer Umweltwirkungen. Der dargestellte Schiffsmotor beispielsweise verursacht in der eigenen Fertigung weniger als 10 t CO_2 pro Motor, in der Lebensphase belaufen sich die Emissionen je nach Lastprofil jedoch auf mehrere 10.000 t/a CO_2 bei einer Betriebsphase von oftmals deutlich über 20 Jahren.

Im Sinne der Umwelt muss das Ziel für fertigende Unternehmen sein, die Gesamtbilanz an Umweltbelastungen zu minimieren, unabhängig davon, in welcher Lebenszyklusphase sie verursacht werden. Die individuellen Hebel, mithilfe derer sich besonders große Effekte erzielen lassen, sind produktspezifisch. Im Falle des dargestellten akustischen Absorbers liegen die direkten Hebel vorrangig in der Fertigung, im entgegengesetzten Fall des exemplarischen Schiffmotors in der Nutzungsphase. Das Potential zur Steigerung der Nutzungsdauer und der Effizienz in der Nutzungsphase kann jedoch ebenfalls entscheidend mit Maßnahmen während der Fertigung realisiert werden. Der Effekt der beschichteten Schraube hängt primär von dem Einsatz und den Umweltbedingungen ab, denen das geschraubte Endprodukt ausgesetzt ist.

Um die Identifikation und Realisierung von signifikanten Hebeln zur Steigerung der Nachhaltigkeit von Produkten und derer Fertigung zu ermöglichen, kann ein vierschrittiges, **systematisches Rahmenwerk** (s. Abbildung 4) genutzt werden. Im ersten Schritt wird das Ziel der Maßnahmen festgelegt, die sogenannte Bilanzhülle, in deren Rahmen Maßnahmen zur Nachhaltigkeitssteigerung ergriffen werden sollen. Diese sollte bestenfalls auf die gesamte Wertschöpfungskette einheitlich bezogen und festgelegt sein, damit die Umweltwirkungen an verschiedenen Stellen der Lebensphasen vergleichbar sind. Auch um eine Gesamtaussage über die Nachhaltigkeit eines Produkts treffen zu können, müssen die verschiedenen Partner der Wertschöpfungskette Nachhaltigkeit auf die gleiche Weise quantifizieren (siehe Abschnitt 3). Aktuell werden diese Bilanzhüllen jedoch oft noch unternehmensspezifisch festgelegt, was jedoch eine schnelle Identifikation der Hebel zur Steigerung der Nachhaltigkeit und der Quantifizierung von deren Effekten für die eigenen Fertigungsprozesse ermöglicht (siehe Abschnitt 4).

Um die Zielerreichung bewerten zu können, muss ökologische Nachhaltigkeit jedoch erst quantifizierbar sein. ***„You can't manage what you don't measure"*** ist ein treffendes Zitat des US-amerikanischen Ökonomen Peter Drucker. Ökologische Nachhaltigkeit verbessern und Vorgaben zielgenau erfüllen ist nicht möglich, wenn die eigentliche zu quantifizierende ökologische Nachhaltigkeit nicht bekannt ist. Um sie quantifizierbar zu machen, müssen einerseits die relevanten Größen in der Fertigung messbar gemacht werden und andererseits eine Methode angewendet werden, die die gemessenen Zahlenwerte in eine Aussage über den Effekt von Maßnahmen zur Steigerung der ökologischen Nachhaltigkeit übersetzt. Mithilfe der sogenannten Ökobilanzierung werden Methoden gegeben, die die im Unternehmen gemessenen Größen in beispielsweise ein CO_2-Äquivalent umwandeln und damit vergleichbar machen. Deren Ergebnis ist jedoch abhängig davon, welche Daten in den Bilanzgrenzen berücksichtigt werden und wie gut die Qualität dieser Daten ist. Es müssen also die „richtigen" Daten erfasst werden. Ist nun die ökologische Nachhaltigkeit des Unternehmens messbar, lassen sich die Stellen, an denen Defizite bestehen, ermitteln. Aus den Defiziten und Potenzialen lassen sich zielgerichtet Maßnahmen ableiten, mithilfe derer die Fertigung ressourcenschonender und energieschonender agieren kann. Wie dieser Beitrag zeigt, sind diese Maßnahmen vielfältig. Einerseits gibt es kurzfristige Einzelmaßnahmen IN der Fertigung. Diese haben zwar eine begrenzte Wirkung, sind aber schnell umsetzbar und können, besonders in Summe, sehr effektiv sein. Diese kurzfristigen Maßnahmen befinden sich primär direkt IN der Fertigung, z. B. in Form der Nutzung von Standby Modi und des Umstiegs auf grünen Strom. Wie bereits festgestellt, ist jedoch der gesamte Produktlebenszyklus relevant für die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbetrachtung. Oftmals sind die Hebel, die in der Produktnutzungsphase liegen, die größten, da sie langjährige Verbräuche und damit einhergehende Emissionen betreffen. Die zugehörigen Maßnahmen, die MIT der Fertigung (z. B. die fertigungsprozessbedingte Effizienzsteigerung eines Motors) sind langfristig und können bedeuten, dass einmalig in der Fertigung auch mehr Ressourcen eingesetzt werden sollten, wenn die Einsparungen hieraus über den gesamten Produktlebenszyklus überwiegen. Der Fertigung kommt somit eine Doppelrolle zu. Einerseits gilt es kurzfristig Potentiale

zur Steigerung der unternehmensinternen Nachhaltigkeit zu ergreifen, mittel bis langfristig kommt der Fertigung in zunehmendem Maße die bedeutende Rolle als Befähiger für nachhaltige Produkte zu (siehe Abbildung 4).

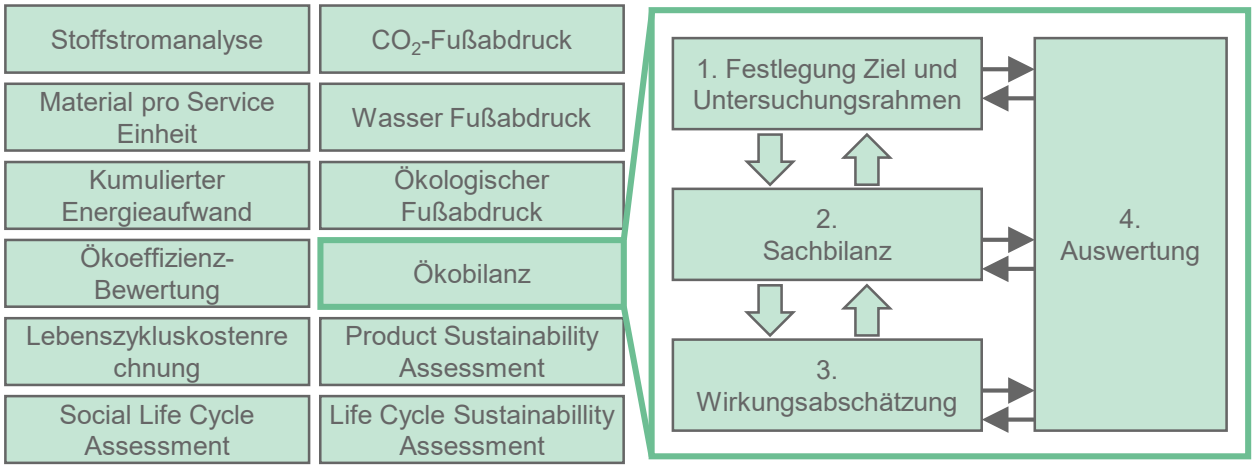


Abbildung 4: Vorgehen zur Identifikation von Hebeln zur Verbesserung der Nachhaltigkeit

3 *„You can't manage what you don't measure"* - Grundlagen der Ökobilanzierung

Um die ökologische Nachhaltigkeit der eigenen Fertigung und der gefertigten Produkte verbessern zu können, muss man diese zunächst quantifizieren können. Es existieren verschiedene Methoden, mit denen die ökologischen Auswirkungen von Unternehmen und Fertigungsprozessen bewertet werden können (s. Abbildung 5). Den Kern aller aufgelisteten Methoden bildet die **Ökobilanzierung** nach DIN EN ISO 14040/44. Die Ökobilanzierung bietet die Möglichkeit, alle Auswirkungen eines Produkts, Prozesses oder einer Dienstleistung auf die Umwelt von der Rohstoffgewinnung bis hin zur Entsorgung zu betrachten. Damit kann die Ökobilanzierung entweder für ein einzelnes Produkt, einen Fertigungsprozess oder für das gesamte Unternehmen durchgeführt werden. [7], [8]

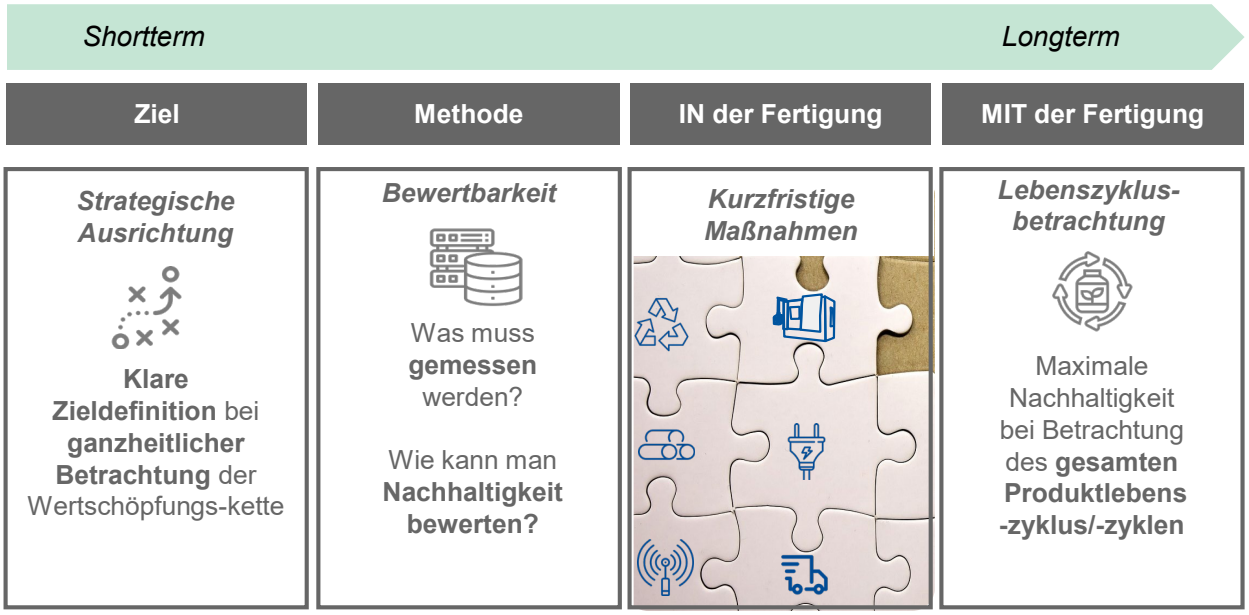


Abbildung 5: Methodensammlung zur Ökologiebewertung nach Andes [9] und die vier Phasen einer Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 [7]

Die Ökobilanzierung besteht aus vier unterschiedlichen Phasen, welche iterativ durchlaufen werden. Die vier Phasen sind:

1. **Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmen:** In dieser Phase wird der Untersuchungsgegenstand definiert, welcher analysiert werden soll. Dies umfasst die Festlegung der funktionalen Einheit, der Systemgrenzen, der Datenquellen und der methodischen Ansätze (siehe Ziel/Bilanzhülle Abschnitt 2).
2. **Sachbilanzierung:** In dieser Phase werden die Daten zu den Umweltauswirkungen des Produkts oder der Dienstleistung gesammelt und analysiert. Dazu werden in der Regel verschiedene Instrumente, Methoden und Modelle eingesetzt, um die Umweltauswirkungen in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus zu quantifizieren.
3. **Wirkungsabschätzung:** In dieser Phase werden die ermittelten Umweltauswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit bewertet. Dazu werden die Auswirkungen auf verschiedene Kategorien wie Klimawandel, Versauerung, Eutrophierung, Ressourcennutzung und Toxizität quantifiziert.
4. **Auswertung:** In dieser Phase werden die Ergebnisse der Ökobilanzierung interpretiert und kommuniziert. Dabei werden die Ergebnisse in Bezug auf die Zielsetzungen und die Kontexte der Studie bewertet und die Ergebnisse präsentiert, um Entscheidungen zu unterstützen, die Umweltauswirkungen zu reduzieren.

Im Folgenden werden die Phasen der Ökobilanzierung am Beispiel der Fertigung einer Ritzelwelle erläutert. In einem Forschungsdemonstrator am WZL | RWTH Aachen Universtiy wurde eine Ritzelwelle für einen Elektroantrieb eines PKW gefertigt. Für die Ferti-gung der Ritzelwelle wurde eine Ökobilanzierung durchgeführt. Das Ziel der Ökobilanzie-rung war es, die Umweltwirkungen der Fertigungsprozesse zu berechnen. In diesem so-genannten Tor-zur-Tor (engl. Gate-to-Gate) Ansatz, werden alle wertschöpfenden Ar-beitsschritte in der Produktion berücksichtigt, siehe Abbildung 6. Die Nutzung sowie die Entsorgung der Ritzelwelle wurde in der Bilanz nicht berücksichtigt. Insgesamt wurden fünf Fertigungsverfahren zur Fertigung der Ritzelwelle aus einem Rundmaterial-Rohling verwendet: Weichbearbeitung in einem Dreh- Fräszentrum, Weichverzahnung, Härten, Schleifen (Rundschleifen) und Hartverzahnen (Profilschleifen). Zu beachten ist, dass das Härten bei einem externen Zulieferer durchgeführt wurde und damit keine Daten zur Auswertung vorlagen. Somit bilden die vier Fertigungsverfahren das für die Ökobilanzierung betrachtete Produktsystem. Die funktionelle Einheit dieses Produktsystems ist die Fertigung einer Ritzelwelle. Bei der funktionellen Einheit eines Produktsystems, handelt es sich um eine Referenzeinheit, auf welche alle entstehenden Umweltwirkungen bezogen werden.

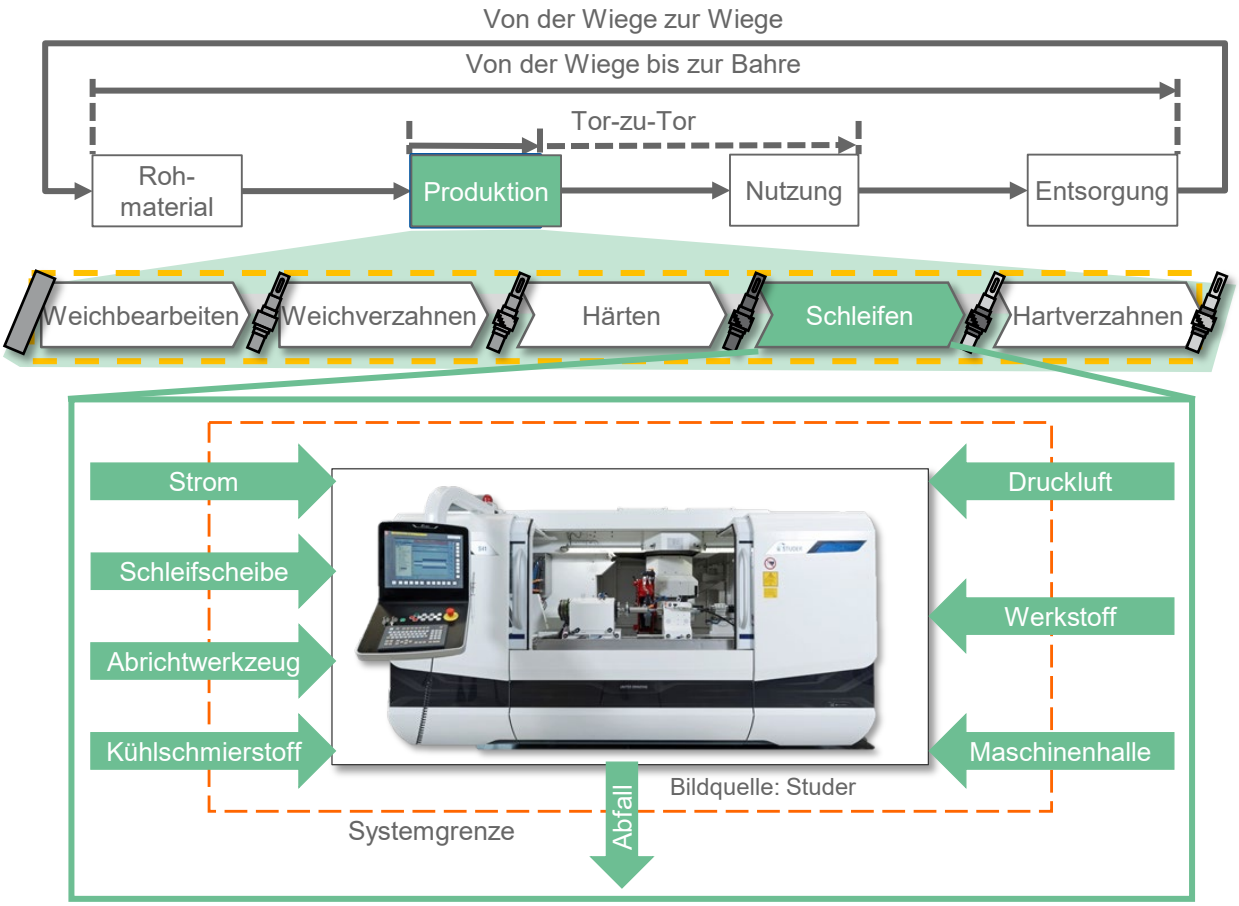


Abbildung 6: Produktsystem für die Fertigung der Ritzelwelle und zu bilanzierende Ströme eines Fertigungsprozesses am Beispiel eines Schleifprozesses

Die zweite Phase der Ökobilanzierung ist die Sachbilanzierung. In der Sachbilanzierung werden alle relevanten Energie- und Stoffströme für die einzelnen Fertigungsschritte identifiziert und erfasst. Letztlich entstehen Umweltwirkungen ausschließlich durch den Einsatz von Energie in Form von Strom, Wärme, Kälte sowie chemische Prozesse und durch die Verwendung von Materialien. Jedes Material findet seinen Ursprung in der Umwelt, indem Rohstoffe abgebaut werden und durch den Einsatz von Energie weiterverarbeitet werden. Energie wird in Form von Strom durch Kraftwerke bereitgestellt, die Umweltwirkungen richten sich nach dem Strommix des Landes, der Region oder des Unternehmens.

In Abbildung 6 ist die Sachbilanzierung qualitativ für den Rundschleifprozess dargestellt. Für die Ökobilanzierung wurden diese Energie- und Stoffströme erfasst. Für die Erfassung des Stromverbrauchs wurden Sensoren nachgerüstet.

In der dritten Phase der Ökobilanzierung (Wirkungsabschätzung) wurde zur Berechnung der Umweltwirkungen die ReCiPe Methode verwendet [10]. Dabei handelt es sich um eine renommierte Methode, welche in der wissenschaftlichen Literatur häufig verwendet wird. Mit ReCiPe können bis zu 16 unterschiedliche Umweltwirkungen berechnet werden, beispielsweise Klimawandel, Wasserverbrauch, Feinstaubbelastung, Versauerung von Böden oder Meeren. Bei der Erstellung der Wirkungsabschätzungsmethoden handelt es sich um multi-interdisziplinäre Vorhaben, bei denen eine Vielzahl an Forschergruppen in Ihren Fachbereichen die Umweltwirkungen einzelner Stoffe auf die Umwelt beschreiben und quantifizieren. Die Methoden sind aktueller Gegenstand der Forschung und werden regelmäßig aktualisiert.

Abbildung 7 zeigt eine Auswertung der Ökobilanzierung. Im Diagramm sind die emittierten CO_2-eq pro gefertigte Ritzelwelle aufgetragen. Oben wurden nur die Fertigungsprozesse berücksichtigt. Darunter wurde zusätzlich der CO_2-Rucksack des verarbeiteten Halbzeugs berücksichtigt. Auffällig ist, dass das Rohmaterial bereits sehr viel CO_2 des Endproduktes enthält. Daher ist es besonders wichtig, IN der Fertigung verwendete Ressourcen effizient einzusetzen und Ausschuss zu vermeiden. Außerdem ist zu beachten, auch wenn der Beitrag der Fertigung zum Klimawandel in diesem Beispiel auf den ersten Blick gering erscheint, wurden in dieser Untersuchung nur die Emissionen einer Ritzelwelle betrachtet. Im industriellen Umfeld werden wesentlich höhere Stückzahlen produziert, dementsprechend skalieren die Umweltwirkungen. Die vollständige Studie kann bei BECKERS et. al nachgelesen werden. [11]

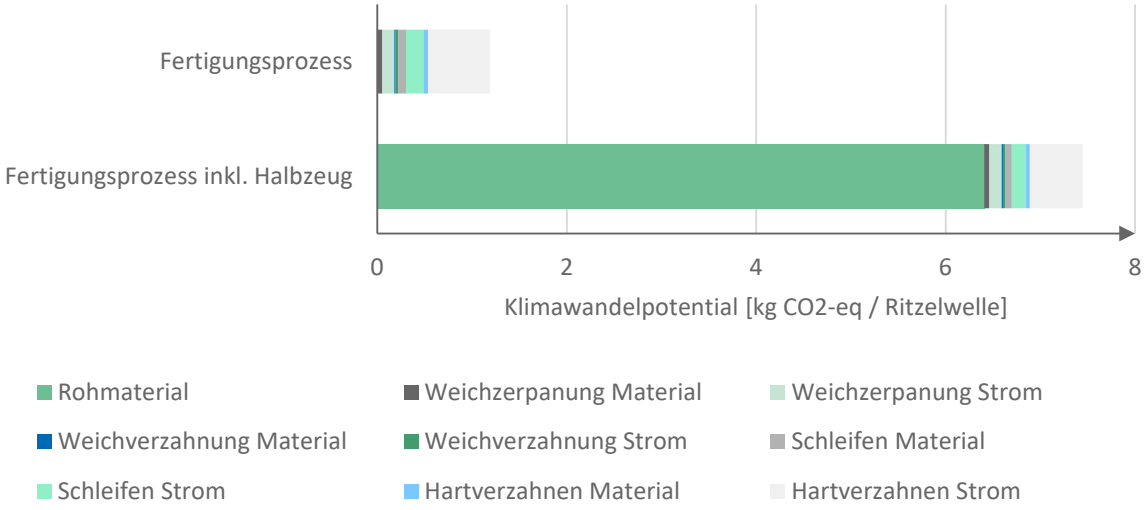


Abbildung 7: Klimawandelpotential einer Ritzelwelle mit und ohne Berücksichtigung des verarbeiteten Halbzeugs

Zusätzlich ist zu beachten, dass durch die Erweiterung des Betrachtungsrahmens auf die Rohstoffherstellung die Umweltwirkungen stark gestiegen sind. Um einen vollständigen Product Carbon Footprint (PCF) zu berechnen, ist die Berücksichtigung der Nutzungsphase und der Entsorgung ebenfalls notwendig. Auch wenn diese Lebenszyklusphasen oftmals noch nicht in der Bilanzgrenze der produzierenden Unternehmen ist, entstehen hier mit den richtigen Maßnahmen MIT der Fertigung große Potentiale. Auch hier können beispielsweise durch eine funktionale Verbesserung der Ritzelwelle der Wirkungsgrad des Getriebes verbessert werden und dadurch in der Nutzungsphase des PKWs über km-Laufleistung signifikante Emissionen eingespart werden. Doch um die Nutzungsphase oder die Entsorgung von Produkten bereits in der Fertigung zu berücksichtigen sind zum einem eine Vielzahl von Daten aus der Nutzungsphase notwendig, welche erhoben werden müssen. Zum anderen bedarf es einer Vernetzung der Wertschöpfungskette, um diese Daten zu teilen. Zur Reduktion des PCF, wird es zukünftig notwendig sein, dass die Stakeholder entlang der Wertschöpfungskette von Produkten verstärkt zusammenarbeiten.

4 Best-Practice – Beispiele zur Effizienzsteigerung in der Fertigung

4.1 Fertigungsprozessbezogene Schaffung von Transparenz und Ableitung von kurzfristig realisierbaren Maßnahmen

Mit der zunehmenden Notwendigkeit zur Schaffung von Transparenz in der Energie- und Materialnutzung geht eine zunehmende Digitalisierung der Prozesse einher. Hier stehen viele fertigende Unternehmen aktuell noch vor Herausforderungen. So werden beispielsweise Energieverbräuche oft nicht pro Maschine aufgenommen, sondern übergreifend über den gesamten Shopfloor. Eine Datenerfassung sollte strukturiert und zielgereichtet erfolgen, d. h. die Daten müssen in der korrekten Granularität für die weitere zielgerichtete Verwendung gewonnen werden. Im Beispiel des Energieverbrauchs pro Maschine wäre dementsprechend eine Zählerinfrastruktur auf Maschinenebene notwendig. Erfolgreiche Ansätze aus der Praxis haben die Schaffung von Transparenz über die Produktionsprozesse und die darauf aufbauende Identifikation von Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Energie- und Materialverbräuchen sowie den zugehörigen datenbasierten Maßnahmen gemein.

Die B+T Unternehmensgruppe beispielsweise konnte durch die **Schaffung von Transparenz** über ihre Produktionsprozesse zahlreiche derartige Maßnahmen umsetzen. Die damit einhergehende Transparenzschaffung kann sich auf verschiedenen Ebenen bewegen. Die Energieverbräuche einzelner Prozesse in den Werken wurden mithilfe von Dashboards für die Mitarbeitenden transparent gemacht. Unter anderem wurde der Energieverbrauch von Galvanikanlagen bezogen auf die beschichte Oberfläche ausgewertet. So konnte die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht, Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Energieverbräuchen bei Beschichtungsprozessen identifiziert sowie Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz ergriffen werden (siehe Abbildung 8). Die Aufzeichnungen ergaben deutliche Schwankungen bei der beschichteten Fläche pro Energieeinsatz in Form von Energieverbrauchsspitzen, die zuvor unbemerkt blieben. Im Zuge der Transparenzschaffung wurden sie aufgedeckt und die Ursachen erforscht sowie Verbesserungsmaßnahmen identifiziert. Die zielgerichtete und auf den Stakeholder angepasste Visualisierung der Daten ermöglicht einerseits dieses schnelle Beheben ungewollter Prozessabweichungen, andererseits bietet sie zusätzlich das Potential, durch eine angepasste Produktionsplanung Energiekosten zu sparen und für den Kunden Transparenz über dessen Aufträge zu schaffen. Mithilfe verschiedener weiterer Maßnahmen, wie beispielsweise der Anpassung der Wartungszyklen konnte die B+T Unternehmensgruppe den Energieverbrauch pro erzeugter beschichteter Flächeneinheit reduzieren. Zusätzlich ermöglichte die geschaffene Transparenz strategische Entscheidungen zur zeitlichen Verlagerungen von Prozessen mit hohen Energieverbräuchen auf Zeiten mit verhältnismäßig geringen Stromkosten.

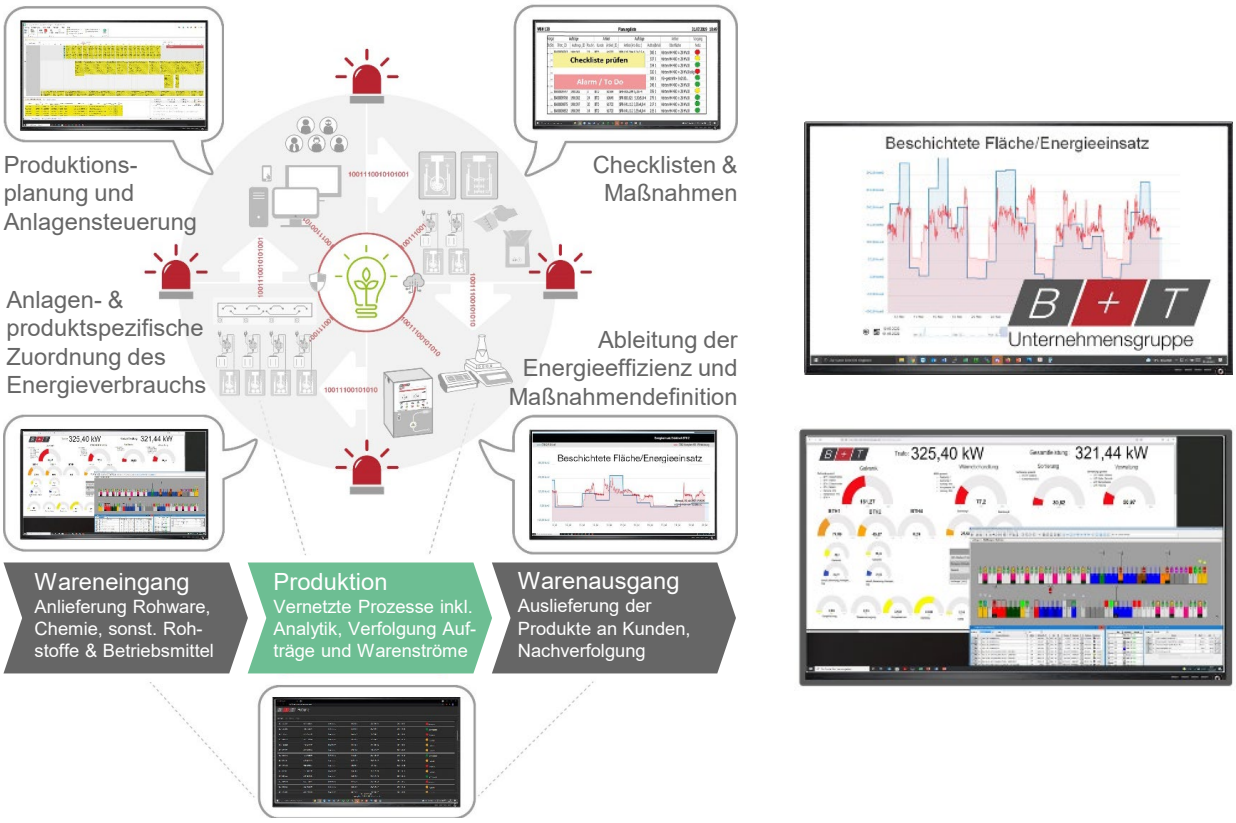


Abbildung 8: Prozessspezifische Datengrundlage ermöglicht übergreifende Transparenzschaffung und eröffnet Maßnahmenräume

Die Erstellung einer digitalen Plattform zur Visualisierung von Maschinendaten ist jedoch aufwendig und kostenintensiv. Daher bieten beispielsweise zunehmend Dienstleister, wie die WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH, Unterstützung bei diesem Prozess an. In diesem Beispiel werden Prozessdaten der angeschlossenen Maschinen nahezu in Echtzeit erfasst und mittels eines Dashboards in entscheidungsunterstützender Weise visualisiert. Aus Basis der erfassten Daten werden können die berücksichtigen Prozesse analysiert und die Anlagenauslastung optimiert werden.

Auch die BMW AG setzt zahlreiche Maßnahmen zur Transparenzschaffung und Reduktion von Energieverbräuchen um. Im ersten Schritt wurden dazu standardisierte Energiebausteine definiert und Transparenz durch die Standardisierung der Energiemesstechnik und der Nutzung eines ressortübergreifenden Energieservers geschaffen, was die **Live-Energieverbrauchsüberwachung** innerhalb der betreffenden Werke ermöglicht. Die Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung wurden im Werk Steyr initiiert und inzwischen in verschiedenen weiteren Werken der BMW AG ausgerollt, sodass z. B. der Energieserver in verschiedenen Werken der BMW AG weltweit genutzt wird. Aus den Energiedaten wurden Energiekennzahlen abgeleitet, wie beispielsweise die Grundlastleistung, der Energieverbrauch pro erzeugtem Produkt und der Energienutzungsgrad innerhalb der Wertschöpfung. Darauf aufbauend wurden **Verbesserungsmaßnahmen** definiert. Die Grundlast beispielsweise wurde reduziert, indem Anlagen in produktionsfreien Zeiten abgeschaltet wurden, die Umwälzzeiten von drei- bis viermal pro Stunde auf einmal pro Tag reduziert wurden und ressourcenschonende Modi für Maschinenbereitschaft programmiert wurden. Außerdem wurden die Vorlaufkühlung und die Anlagenabsaugung in

produktionsfreien Zeiten abgeschaltet. Allein durch diese Maßnahmen zur Grundlastreduzierung konnten im Werk Steyr 4,2 GWh pro Jahr eingespart werden, dies entspricht dem jährlichen Verbrauch von rund 840 Einfamilienhäusern.

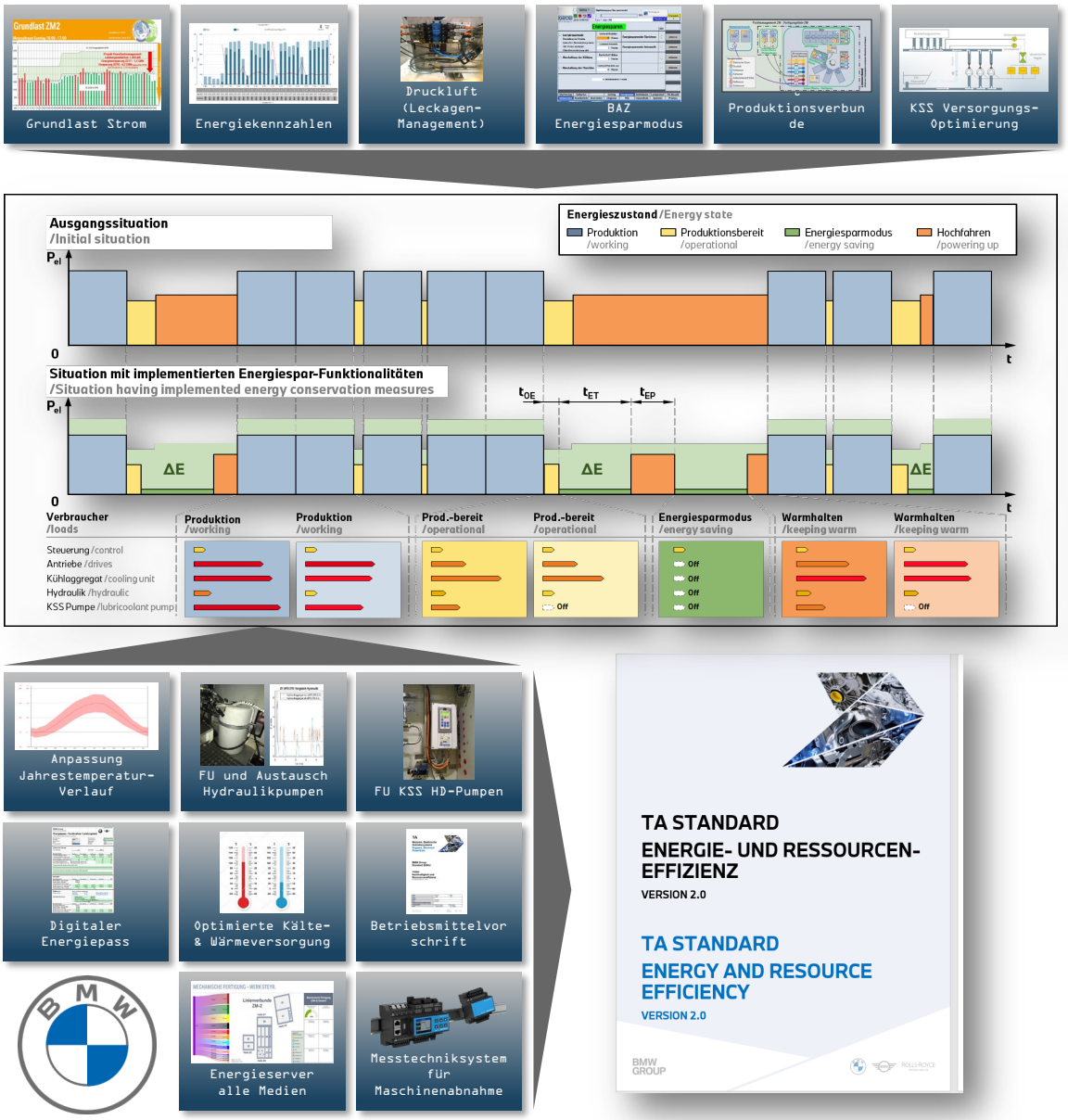


Abbildung 9: Schaffung einer gesteigerten Energieeffizienz und Standards auf Basis von standardisierten Energiebausteinen bei der BMW AG (Auszug)

Die Einführung eines Energiesparmodus für Bearbeitungszentren führte zu einer Einsparung von weiteren 2 GWh pro Jahr. Ziel war es, den Energieverbrauch in den nicht wertschöpfenden Nebenzeiten möglichst zu eliminieren, wie Abbildung 9 oben verdeutlicht. Gleichzeitig konnte die Energieeffizienz in den wertschöpfenden Prozessen gesteigert werden. Die Effizienzsteigerung in der Produktion erstreckte sich auch auf die Peripherieausstattung. Die Ausstattung der Kühlschmierstoff-Hochdruck-Pumpen mit Frequenzumrichtern führten zu einer Einsparung von 1,7 GWh pro Jahr. Diese regeln die Pumpendrehzahl anhand zweier Regelgrößen (Druck & Volumenstrom). Die Einsparungen von 27,1 % wurden zuvor durch die TU Wien mittels Simulation berechnet. Insgesamt konnte durch die Umsetzung zahlreicher Einzelprojekte (neben den genannten Projekten wurden

z. B. auch Heizung, Lüftung und Druckluftversorgung betrachtet) 30 % des Energieverbrauchs der betrachteten Produktionslinie eingespart werden. Durch die seit dem Jahr 2016 umgesetzten Energieeffizienzprojekte wird in der Produktion eine wiederkehrende **jährliche Energieeinsparung von 28,7 GWh** erreicht. Aufbauend auf den Erkenntnissen entwickelte die BMW AG weiterhin den Digitalen Energiepass, einen Energie- und Ressourceneffizienzstandard, der die Anforderungen an die Energieeffizienz zukünftig zu beschaffende Anlagen festlegt und somit zu einem zukünftigen Vergabekriterium wird. Das Vorgehen zur Erstellung der Energiebaustein, der transparenten Visualisierung der Produktionsdaten bis hin zur Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen bei der BMW AG und dem zukünftig geltenden Energie- und Ressourceneffizienzstandard ist Abbildung 9 zusammengefasst.

Die Praxisbeispiele zeigen, dass sich auch mit kurzfristig realisierbaren Einzelmaßnahmen nennenswerte Energieeinsparungen erzielen lassen, wenn im ersten Schritt die Transparenz über die Verbräuche und Zustände in der Fertigung geschaffen wird und auf deren Basis Abweichungen und Potenziale identifiziert werden können.

4.2 Steigerung der Effizienz von Maschinen

Entsprechend der zunehmenden Anforderungen, wie oben beschrieben beispielsweise bei der BMW AG, sind Maschinenhersteller bestrebt, ihren Beitrag zu einer zukünftigen, nachhaltigeren Fertigung zu liefern. Um an einem Markt mit derartigen Anforderungen bestehen zu können, sind Maschinen- und Anlagenhersteller sowie Hersteller von Maschinenkomponenten aktiv, um effektive Hebel zur Effizienzsteigerung bei ihren Produkten zu heben.

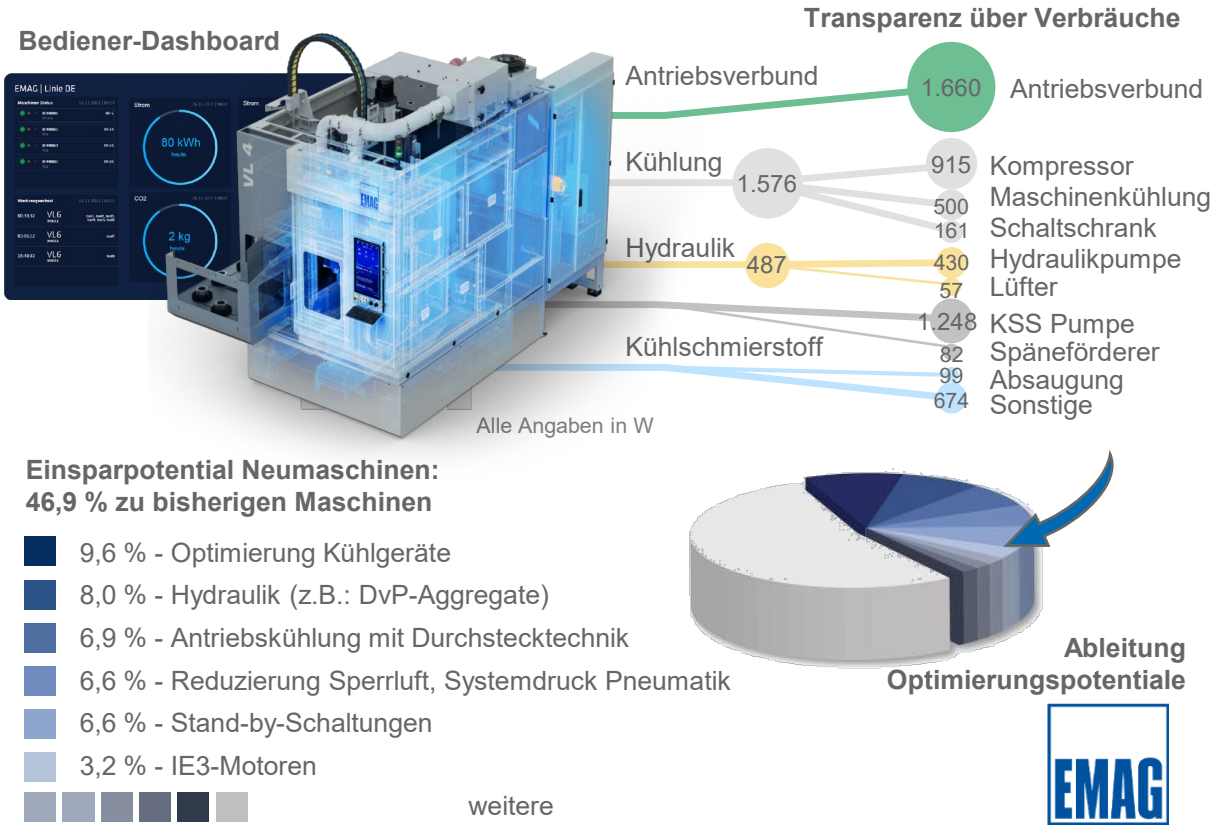


Abbildung 10: Aufschlüsselung des Energieverbrauchs einer Drehmaschine [6]

Die EMAG GmbH & Co. KG verfolgte bereits in der Vergangenheit Effizienzsteigerungsmaßnahmen von Einzelkomponenten, wie z. B. von eingesetzten Pumpen oder Motoren.

Ein großer Hebel für weitere Effizienzsteigerungsmaßnahmen besteht in der prozessspezifischen Auswahl optimiert dimensionierter Maschinen. Mit ihrem Dashboard, dem sogenannten EMAG Energy Monitor (s. Abbildung 10) werden die Verbrauchsdaten der Werkzeugmaschinen nahtlos in einer IoT Plattform integriert und können zentral, z. B. für eine ganze Fertigungslinie oder direkt auf der Maschine visualisiert und analysiert werden.

Ein exemplarisches Analyseergebnis von Energieverbrauchsdaten einer Drehmaschine ist in Abbildung 10 in Form einer Aufteilung des gesamten Leistungsaufnahme in die Einzelkomponenten dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Antriebe, die Kühlung der Komponenten sowie die Kühlschmierstoffversorgung und -aufbereitung die größte Leistungsaufnahme innerhalb der Drehmaschine verursachen. Die Verfügbarkeit dieser Daten bietet die **Möglichkeit zur Diagnose und zur Bewertung effizienzsteigernder Maßnahmen**. Auf Basis dessen wurde im Beispiel von EMAG abgeleitet, dass das größte Energieeinsparpotential in der Optimierung der Kühlgeräte, der Hydraulik und der Antriebskühlung besteht. Potentielle Stellhebel sind z. B. die Reduzierung der Sperrluft, Standby-Schaltungen, IE3-Motoren oder frequenzgeregelte Hilfsantriebe.

Einen Ansatz zur Optimierung des Antriebsverbunds bietet der Spindelproduzent von der GMN Paul Müller Industrie GmbH & Co. KG. Wird beispielsweise ein Elektromotor in einem Teillastbereich betrieben, so resultiert ein geringerer **Wirkungsgrad**. Die Reduktion des Wirkungsgrades ist je nach Motortyp und Effizienzklasse signifikant [12]. Daher ist die Überdimensionierung von Spindeln in Werkzeugmaschinen zu vermeiden. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, ist jedoch die Kenntnis über den/die Betriebspunkt/e, d. h. die Leistungsaufnahme der Spindel in Abhängigkeit von der Drehzahl notwendig. Oftmals ist dem Anwender nicht bekannt, in welchen Betriebspunkten eine Spindel betrieben wird bzw. welche Leistungsanforderungen an die Spindel während des Betriebs gestellt werden. Daher entwickelte GMN ein Konzept für Industrie-4.0-fähige IoT-Ready-Hochleistungsspindeln (s. Abbildung 11), die mit einer integrierten Datenschnittstelle u. a. eine laufzeitabhängige Leistungserfassung ermöglicht. Zusätzlich ist die Erfassung weiterer relevanter Messsignale, z. B. für das Condition Monitoring, möglich.

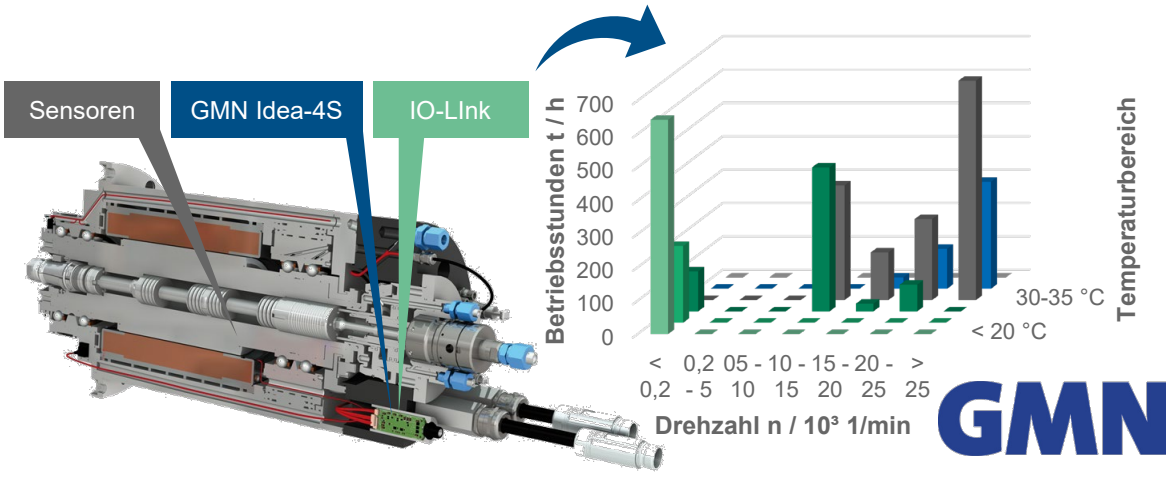


Abbildung 11: Gestiegene Anforderungen an eine Spindel in Werkzeugmaschinen [13]

Somit wird Transparenz über die realen Betriebspunkte geschaffen und eine kundenorientierte, leistungsfallspezifische Spindelauslegung auf die abgerufenen Betriebspunkte ermöglicht. Basierend auf der Kenntnis der realen Spindelanforderungen kann eine Synchronspindel mit optimaler maximaler Leistung entwickelt werden, sodass für den An-

wendungsfall lediglich die tatsächlich erforderliche Leistung bei Spindel und Frequenzumrichter installiert wird (s. Abbildung 11) und somit einerseits der gesamte Wirkungsgrad der Spindel/Maschine gesteigert und der Ressourceneinsatz bei der Anschaffung reduziert werden kann [13].

4.3 Steigerung der Effizienz der Maschinenperipherie am Beispiel der Kühlschmierstoffzufuhr und -aufbereitung

Einen großen Stellhebel zur Einsparung von Energie und zur Effizienzsteigerung von Fertigungsprozessen stellt die Kühlschmierstoffzufuhr (KSS-Zufuhr) dar. Beispielhaft verursacht die **Kühlschmierstoffzufuhr im Schleifprozess über 60 % des Energieverbrauchs** [14]. Die Kühlschmierstoffzufuhr ist im Schleifprozess im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren von besonderer Relevanz, weil aufgrund negativer Spanwinkel und vieler paralleler Korneingriffe eine hohe thermische Belastung entsteht, die nur zu geringen Teilen über die Späne abgeführt werden kann [15]. Außerdem belastet die Entsorgung von Kühlschmierstoff als Sondermüll die Umwelt und somit die Ökobilanz. Um den Energieverbrauch durch die Kühlschmierstoffzufuhr in den Prozess und die Menge an benötigtem Kühlschmierstoff zu reduzieren, gibt es mehrere Ansatzpunkte.

Eine Möglichkeit, sowohl den erforderlichen Volumenstrom als auch den erforderlichen Druck des Kühlschmierstoffs zu reduzieren und die Kühlschmierung des Fertigungsprozesses zu optimieren, ist der Einsatz von prozessspezifischen und optimierten Düsenkonzepten [15]. Bei der Optimierung der Düsenkonzepte ist die bestmögliche Kombination der sich gegenseitig beeinflussenden Kenngrößen Ressourcenschonung, Prozessproduktivität und Produktqualität zu finden.

Welches Potential zur Energieeinsparung die Optimierung des Düsenkonzepts bietet, zeigt das in Abbildung 12 dargestellte Beispiel beim Außenrundschleifen der Fa. Grindaix [16]. Die ursprüngliche Düsenkonfiguration (a) war für die verwendete Schleifscheibe zu breit ausgelegt. Dies führte bei einem Druck p_{KSS} = 0,92 bar und einer Austrittsgeschwindigkeit v_{KSS} = 9,6 m/s zu einem Volumenstrom $Q_{Düse1}$ = 57 l/min. Durch die Verwendung einer an die Schleifscheibengeometrie angepassten Nadeldüse (b) konnte bei gleichem Druck p_{KSS} und gleicher Austrittsgeschwindigkeit v_{KSS} der Volumenstrom auf $Q_{Düse2}$ = 18,11 l/min um ca. 68 % reduziert werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung der Effizienz beim Einsatz von Kühlschmierstoffen bei Fertigungsverfahren ist die systematische Überwachung der Kühlschmierstoffzufuhr. Durch eine Überwachung des Drucks, der Temperatur und des Volumenstroms in allen Kühlschmierstoffkreisläufen einer Werkzeugmaschine ist zu jeder Zeit bekannt, wann wie viel und an welcher Stelle der Kühlschmierstoff fließt. So ist einerseits eine Minimierung der kühlschmierstoffbedingten Ausfallzeit möglich. Außerdem können die erfassten Daten zur Identifizierung von möglichen Optimierungspotentialen in dem Kühlschmierstoffkreislauf dienen.

Eine beispielhafte Integration einer vollständigen Überwachung des Kühlschmierstoffkreislaufs beim Werkzeugschleifen mit einem System der Fa. Grindaix ist in Abbildung 12 dargestellt. In einem Projekt am WZL | RWTH Aachen University wurden alle Kühlschmierstoffkreisläufe bei einem Werkzeugschleifprozess zur Iden-tifikation von Optimierungspotentialen überwacht [17]. Mit Hilfe der Überwachung der Kühlschmierstoffkreisläufe wurden verschiedene Kühlschmierstrategien verglichen und so die Kühlschmierstoffzufuhr hinsichtlich Produktivität und Effizienz verbessert. Insgesamt erreichte Grindaix bei der Umsetzung der eigenen Ansätze zur Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung (Bedarfsminimierung mittels Düsentechnik und Monitoring,

bedarfsgerechte Regelung und nachhaltige Kühlschmierstofflösungen) in der Produktion eines Kunden aus der Automobilzulieferer-Branche (Kundenbedarf an neuem Öl: 185 Tonnen pro Jahr) eine Reduzierung des Ölverbrauchs um 38 %, 85.000 € jährliche Einsparung an Stromkosten für Kühler und Pumpen und 285.000 € jährliche Einsparung an Kosten für Kühlschmierstoff. Außerdem kann die kontinuierliche Datenaufzeichnung und online Datenauswertung der laufenden Produktion möglichen Ausfällen der Maschinen, die auf die Kühlschmierstoffzufuhr zurückzuführen sind, vorbeugen.

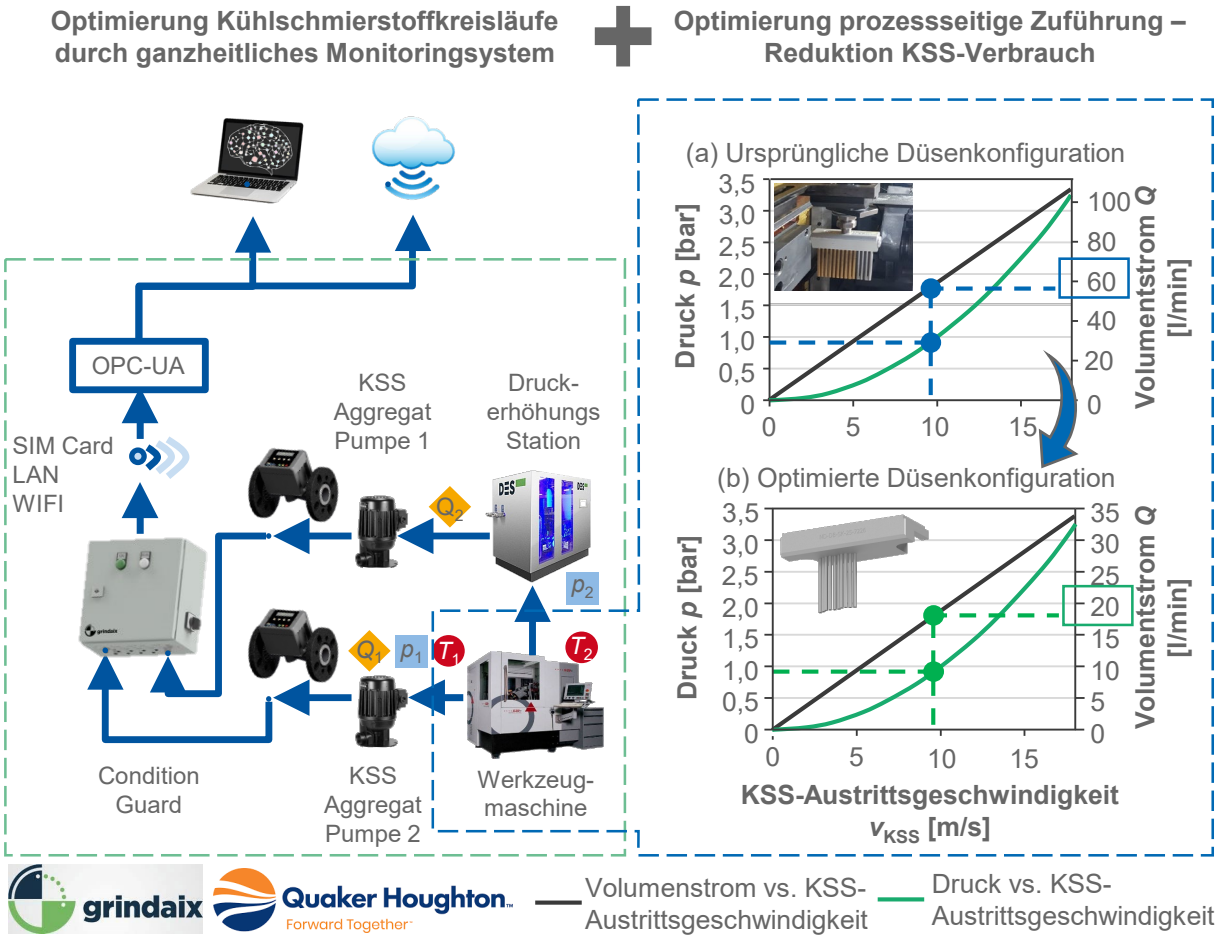


Abbildung 12: Optimierung der Kühlschmierstoffzufuhr durch ein angepasstes Düsenkonzept beim Außenrundschleifen [16]

Öl wird in der Fertigungstechnik in den unterschiedlichsten Anwendungen eingesetzt. So werden z. B. Hydrauliköle, Getriebeöle, Schmieröle, Kompressoröle, Walzöle oder Bearbeitungsöle verwendet. Die Öle müssen nach einer bestimmten Einsatzdauer aufgrund von Kontamination, Additivabbau und Oxidation ausgetauscht werden, so auch Kühlschmierstoffe. Um Öle nahezu unbegrenzt in der identischen Anwendung nutzen zu können, hat das zur SKF Gruppe gehörende Startup RecondOil eine Rekonditionierungstechnik entwickelt. Die zirkuläre Nutzung von Öl hat nicht nur eine wesentliche Verbesserung der Nachhaltigkeit zur Folge, sondern führt zu einer Reduktion der Prozesskosten, da die Beschaffung von Neuölen stark reduziert werden kann. Zudem ist davon auszugehen, dass Fertigungsprozesse, bei denen durch die kontinuierliche Aufbereitung nicht mit gealterten und verschmutzten Ölen gearbeitet wird, eine Leistungssteigerung erfahren.

Herkömmliche Filtersysteme filtrieren Partikel, die größer als 1 µm sind. Jedoch bestehen die Verunreinigungen in Industrieölen zu 80 % aus Nanopartikeln, die kleiner als 1 µm sind. RecondOil fügt dem verschmutzten Öl einen chemischen Booster hinzu, der Verschmutzungspartikel aller Art und Größe bindet (siehe Abbildung 15). So entstehen größere Partikel, die sich aufgrund der höheren Dichte vom Öl trennen und entweder in einer Sedimentationsphase abgeschieden oder mechanisch herausgefiltert werden. Das System kann zum einen als alleinstehende Lösung eingesetzt werden, bei der das Öl aus dem eigentlichen Prozesskreislauf herausgenommen wird. Zum anderen ist eine im Ölkreislauf integrierte Lösung möglich, die hauptsächlich bei zentralen Kühlschmierstoffanlagen eingesetzt wird [18]. Durch die Nutzung von RecondOil konnten in Pilotprojekten zahlreiche Verbesserungen festgestellt werden, sowohl bezüglich der **ökologischen Nachhaltigkeit, als auch der Wirtschaftlichkeit und der Qualität** der produzierten Teile. Die zugehörigen Kennzahlen sind in Abbildung 13 ersichtlich.

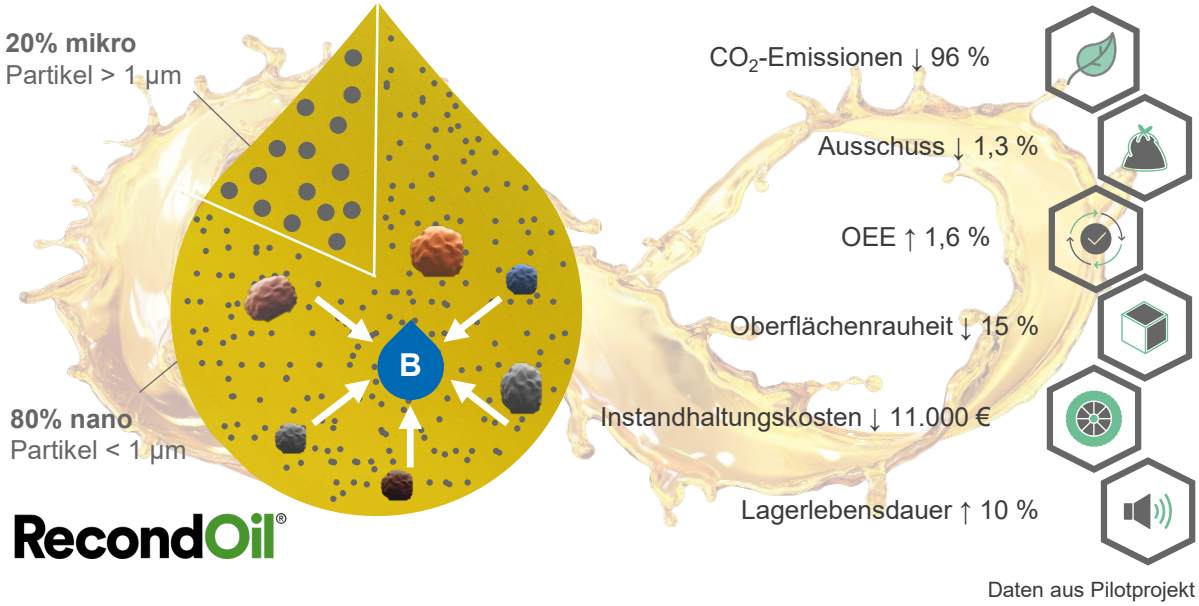


Abbildung 13: Der RecondOil Booster bindet Nano-Partikel im Öl [18]

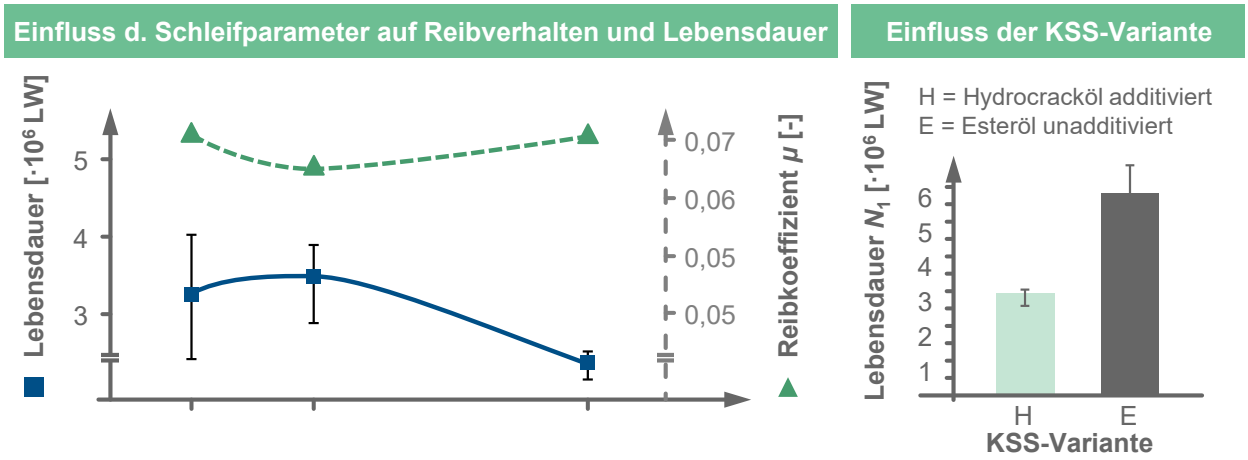
5 Funktionsverlängerung durch Prozessoptimierung in der Fertigung

Neben der Steigerung der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit der Fertigung durch innovative Betriebsmittelreinigung IN der Fertigung lassen sich außerdem Produkte und deren Produktlebenszyklus MIT der Fertigung nachhaltiger gestalten. 87,5 % des CO_2-Fußabdrucks einer Maschine wird während der Nutzungsphase bestimmt. Die Fertigung muss somit mittel- und langfristig als **Enabler zur Verbesserung der Funktion** eines Produkts dienen, sodass durch eine gestiegene Effizienz und erhöhte Lebensdauer des Produkts u.a. die in der Nutzungsphase emittierten Treibhausgase reduziert und die Materialeffizienz erhöht werden.

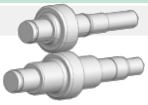
Reibungsreduktion im Wälzkontakt durch Grenzschichtbildung in der Fertigung

Die Steigerung der Funktionalität und der Lebensdauer von rotierenden Produkten kann u. a. fertigungsseitig durch die Optimierung der Produkteigenschaften erzielt werden. Neben einer Reibungsreduktion durch Anpassung der Oberflächengeometrie leisten Grenz-

schichten, die u. a. beim Schleifen durch Wechselwirkungen zwischen der Werkstückoberfläche und dem eingesetzten Kühlschmierstoff entstehen, einen Beitrag zur Reibungsreduktion und zum Verschleißschutz.



0,03	0,05	0,10	Vorschub Schlichten v_{fr2} [mm/min]
0,25	0,30	0,32	Mittenrauwert *Ra* [µm]
-388	-371	-350	Eigenspannungen Oberfläche [MPa]
74	70	68	Fe-Belegung [at-%]
6	11	14	O-Belegung [at-%]
0,7	1,0	1,0	Si-Belegung [at-%]



Betrachtungsgegenstand: Zwei-Scheiben-Tribometer

Abbildung 14: Einfluss der Schleifbearbeitung auf die Reibung und die Lebensdauer im Wälzkontakt

Weiterhin beeinflussen sie die weitere Schichtbildung während des Betriebs im Wälzkontakt mit dem dort eingesetzten Schmierstoff. Somit wird durch eine gezielte Wahl der Additive im Kühlschmierstoff und der Schleifparameter die Reibung im Betrieb und somit die Verlustleistung reduziert. Experimentelle Schleifversuche am WZL | RWTH Aachen Universtiy haben gezeigt, dass durch die Wahl geeigneter Vorschubgeschwindigkeiten beim Schleifen, die unmittelbar die thermo-mechanischen Belastungen in der Kontakt-zone beeinflussen, ein Parameteroptimum im Hinblick auf minimalen Reibungskoeffizient μ und maximale Lebensdauer erreicht wurde. Dies wurde durch die unterschiedliche Ele-mentarzusammensetzung der äußeren Grenzschicht (F-, O- und Si-Belegung) erklärt (siehe Abbildung 14). Bei Verwendung eines unadditivierten Esteröls wurde eine im Ver-gleich zum additivierten Hydrocrackköl doppelt so große Lebensdauer festgestellt. [19]

Erhöhung der Lebensdauer am Beispiel von Getrieben und Elektroantrieben durch Herstellung tribologisch optimierter Funktionsflächen

Zahnradgetriebe, wie im Elektroauto oder im Flugzeugtriebwerk, kommen überall im Ma-schinenbau zur Leistungsübertragung und Steuerung der Drehzahl und des Drehmo-ments zum Einsatz. Bei Zahnrädern wirkt sich eine niedrigere Zahnflankenrauheit positiv auf die Tragfähigkeit einer Zahnflanke aus. Eine niedrige Rauheit wird z. B. durch das Wälzschleifen erzeugt. Ein zusätzlicher Fein- oder Polierschleifprozess mit keramisch oder elastisch gebundenem Korund im Anschluss an den konventionellen Verzahnungs-schleifprozess erzeugt niedrigere Rauheiten und einen höheren Materialanteil. In Tragfä-higkeitsuntersuchungen (siehe Abbildung 15) wurde gezeigt, dass bei den fein- und po-liergeschliffenen Zahnrädern eine deutlich höhere ertragbare Flankenpressung möglich ist. Die Ergebnisse zeigen, dass bei konstanter nomineller Flankenpressung σ^*_{HO} eine

höhere Lebensdauer erreicht wurde. Die Erhöhung der Lebensdauer durch den Fein- oder Polierschleifprozess führt somit trotz eines initial höheren CO_2-Footprints aus der Halbzeugherstellung und der Fertigung zu einer **Ressourcenschonung** durch die verlängerte Sicherstellung der Funktionalität in der Nutzungsphase. Für die maximal untersuchte Lebensdauer wurde durch einen Feinschleifprozess die maximal mögliche nominelle Flankenpressung σ^*_{HO} erhöht. Dies ermöglicht die Konstruktion kompakterer Getriebe mit höherer Leistungsdichte, die in der Nutzungsphase des Getriebes durch ein geringeres Gewicht und ein geringeres Trägheitsmoment Ressourcen einsparen. [20]

Ein weiteres Beispiel, in dem tribologisch optimierte Funktionsflächen einen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten können, sind Rotorwellen von Elektromotoren. Im Vergleich

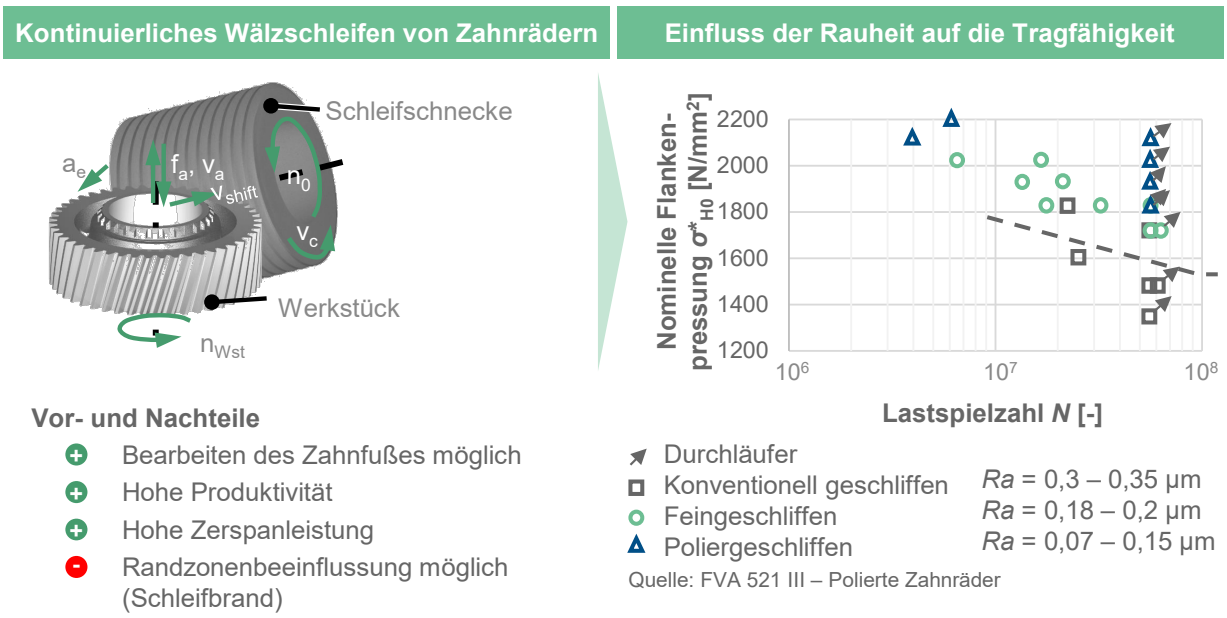
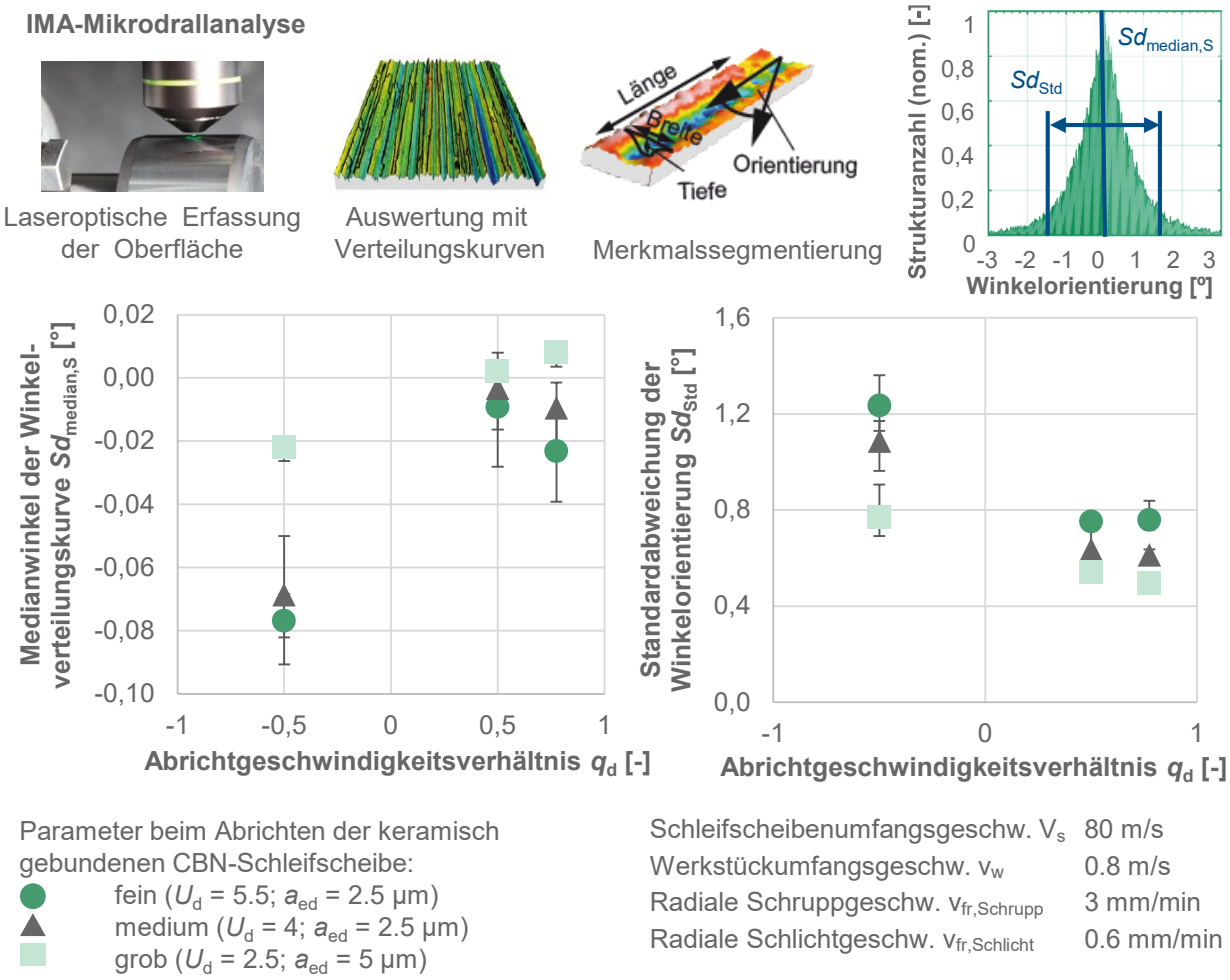


Abbildung 15: Einfluss der Schleifbearbeitung auf die Tragfähigkeit von Zahnflanken

zu Verbrennungsmotoren liegen in elektrischen Antriebssträngen deutlich höhere Drehzahlen vor. Die daraus resultierenden höheren Temperaturen und höheren Gleitgeschwindigkeiten stellen jedoch die zugehörige Dichtungstechnik vor große Herausforderungen. Damit die Lebensdauer ressourcenschonender Systeme nicht durch die mangelnde Abdichtfähigkeit limitiert wird, müssen neben den Dichtelementen auch die tribologischen Eigenschaften der Dichtungsgegenlaufflächen in der Fertigung optimiert werden. Geschliffene Oberflächen bestehen, insbesondere im Gegensatz zu gedrehten Oberflächen, aus einer Vielzahl an Einzelstrukturen, die aufgrund ihrer doppelt konvergenten Form bei Wellenrotation zum Aufbau eines verschleißschützenden Schmierfilms führen. Schleifen ist daher der Standardprozess für die Herstellung von Dichtungsgegenlaufflächen. Unter ungünstigen Bedingungen kann beim Einstechschleifen die Orientierung der einzelnen Schleifstrukturen jedoch von der Umfangsrichtung abweichen.



Parameter beim Abrichten der keramisch gebundenen CBN-Schleifscheibe:

- fein (U_d = 5.5; a_{ed} = 2.5 µm)
- medium (U_d = 4; a_{ed} = 2.5 µm)
- grob (U_d = 2.5; a_{ed} = 5 µm)

Schleifscheibenumfangsgeschw. V_s	80 m/s
Werkstückumfangsgeschw. v_w	0.8 m/s
Radiale Schruppgeschw. $v_{fr,Schrupp}$	3 mm/min
Radiale Schlichtgeschw. $v_{fr,Schlicht}$	0.6 mm/min

Abbildung 16: Einfluss der Abrichtparameter beim Schleifen auf die Mikrodrallstrukturen

Dieser sogenannte Mikrodrall ist aufgrund der hohen Förderwirkung bei hohen Drehzahlen besonders schädlich für ein Dichtsystem und muss daher beim Schleifen durch eine wissensbasierte Prozessauslegung vermieden werden. Bei der Mikrodrallanalyse des Instituts für Maschinenelemente IMA der Universität Stuttgart wird durch optische Messtechnik jede Oberflächenstruktur erfasst und deren Orientierung und Geometrie bestimmt. Geeignete Dichtungsgegenlaufflächen liegen vor, wenn die normierte Strukturanzahl aufgetragen über der Winkelorientierung eine möglichst breite, symmetrische Verteilungskurve mit Hauptmaximum bei einem Winkel von 0° aufweist. Die Breite der Verteilungskurve wird durch die Standardabweichung der Winkelorientierung Sd_{Std} beschrieben, die Lage des Hauptmaximums durch den Medianwinkel der Winkelverteilungskurve $Sd_{median,S}$. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass mit negativem Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis q_d, d. h. wenn die Geschwindigkeitsvektoren der Formrolle und der Schleifscheibe in unterschiedliche Richtungen zeigen und somit flache Eingriffswinkel zwischen Abrichtdiamant und Schleifkorn vorliegen, der Medianwinkel der Winkelverteilungskurve $Sd_{median,S}$ deutlich von der Umfangsrichtung (0°) abweicht. [5] Aufgrund der tribologischen Eigenschaften geschliffener Oberflächen bietet das Fertigungsverfahren somit großes Einsatzpotential, um das Reibungs- und Verschleißverhalten von Antriebskomponenten derart zu verbessern, dass insgesamt ein **signifikanter Beitrag zur Ressourcenschonung im Rahmen der Mobilitätswende** geleistet werden kann.

6 Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft

Wie bereits festgestellt, muss es das Ziel sein, die einem Produkt zuzurechnenden Emissionen über den gesamten Lebenszyklus zu minimieren. Dabei müssen auch die Designphase und das Lebensende berücksichtigt werden. In der Fertigung wird neben Energie auch Material verbraucht. Alles an Material, das als Verschnitt und Abfall entsorgt wird, hat in seiner Herstellung und Verarbeitung bis zu diesem Punkt ebenfalls Umweltwirkungen verursacht. Diese müssen in einer vollständigen Bilanz durch die verkauften Produkte mitgetragen werden. Daher gilt es, den Materialeinsatz möglichst effizient zu gestalten und Abfall zu minimieren, auch aus ökonomischer Sicht.

Weiterhin liegt in der Engineering-Phase ein Hebel zur **Verbesserung der Recyclingfähigkeit** des Produkts. Berücksichtigt man die Recyclingfähigkeit bereits in der Materialauswahl und der Produktauslegung, so lassen sich Bauteile durch Verwendung von Monomaterialen oder modularen Aufbau einfacher verschiedenen R-Szenarien zuführen.

6.1 Materialeffizienz durch Prozessinnovation

Zur Steigerung der Materialeffizienz von Produkten spielen auch einzelne Produktkomponenten und deren Produktion eine große Rolle. Die Schaeffler Gruppe, die als ein weltweit führender Automobil- und Industriezulieferer zukunftsweisende Erfindungen und Entwicklungen in den Bereichen Bewegung und Mobilität vorantreibt, zeigt beispielsweise bei der Produktion von hydrodynamischen Gleitlagern für hochleistungsfähige Windkraftgetriebe aus der Sparte Industrial, wie die Herstellung von Getriebekomponenten in Windturbinen durch **alternative Prozessketten und eine damit einhergehende gesteigerte Materialeffizienz** sowohl in der Fertigung als auch in der Nutzungsphase zukünftig einen entscheidenden Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit leisten und eine zunehmende Kreislaufwirtschaft der gefertigten technischen Produkte ermöglichen kann. Da der Windturbine eine Schlüsselrolle bei der zukünftigen Herstellung von grünem Wasserstoff zukommt, den es für eine Energiewende braucht, ist der Effekt solcher Maßnahmen besonders groß.

Eine der in Abbildung 17 gezeigten Komponenten des Getriebes der Windturbine ist das Gleitlager von Schaeffler. Derzeitiger Stand der Technik sind auf den Planetenradbolzen aufgepresste Bronzebuchsen. Die **konventionelle Prozesskette** besteht in Summe aus 21 Einzelprozessschritten, von denen folgend die wichtigsten erläutert sind. In einem ersten Schritt erfolgt die spanende Bearbeitung des Stahlbolzens und dessen Feinbearbeitung. Darauf folgt die Montage der funktionsgebenden Bronzebuchse mit 15 mm Wanddicke.

Die Bronzebuchse wird durch Aufschmelzen der Legierung in einem Schleudergussverfahren hergestellt und in einem anschließenden Drehprozess auf Kontur gebracht. Im Folgenden erfolgt ein Spannungsarmglühen, gefolgt von einem Feindrehprozess und dem Fügen der Buchse auf den Stahlbolzen durch eine Presspassung. Der resultierende Materialverbrauch der Bronzebuchse liegt bei 30,6 kg der eingesetzten Legierung, was einem CO_2-Equivalent von 156,7 kg pro Teil entspricht.

Die konsequente Weiterentwicklung dieses Gleitlagers ist die Direktbeschichtung des Bolzens mit Hilfe moderner additiver Fertigung. Die in Abbildung 17 dargestellte **innovierte und stark verkürzte Prozesskette** durch die Einbindung eines Laser-Auftragsschweißprozesses verfügt über eine hohe geometrische Flexibilität. Zusätzlich garantiert dieser Prozess eine starke Materialverbindung zwischen dem Stahlbolzen und der

Bronze-Funktionsschicht. Die gesamte Prozesskette kann dadurch auf lediglich 14 Prozessschritte reduziert werden, die wichtigsten davon sind die spanende Bearbeitung des Stahlbozens, das direkte Laser-Auftragsschweißen auf den Stahlbolzen und die finale Endbearbeitung (siehe Abbildung 17). Gleichzeitig kann durch die prozessbedingte Reduzierung der Funktionsschichtdicke auf 1 mm statt 15 mm eine Reduktion des Bronzenmaterials auf nur 2,9 kg erzielt werden, was einer Materialreduktion von bis zu 90% entspricht. Die damit verbundenen CO_2-Emissionen werden somit auf 14,7 kg reduziert.

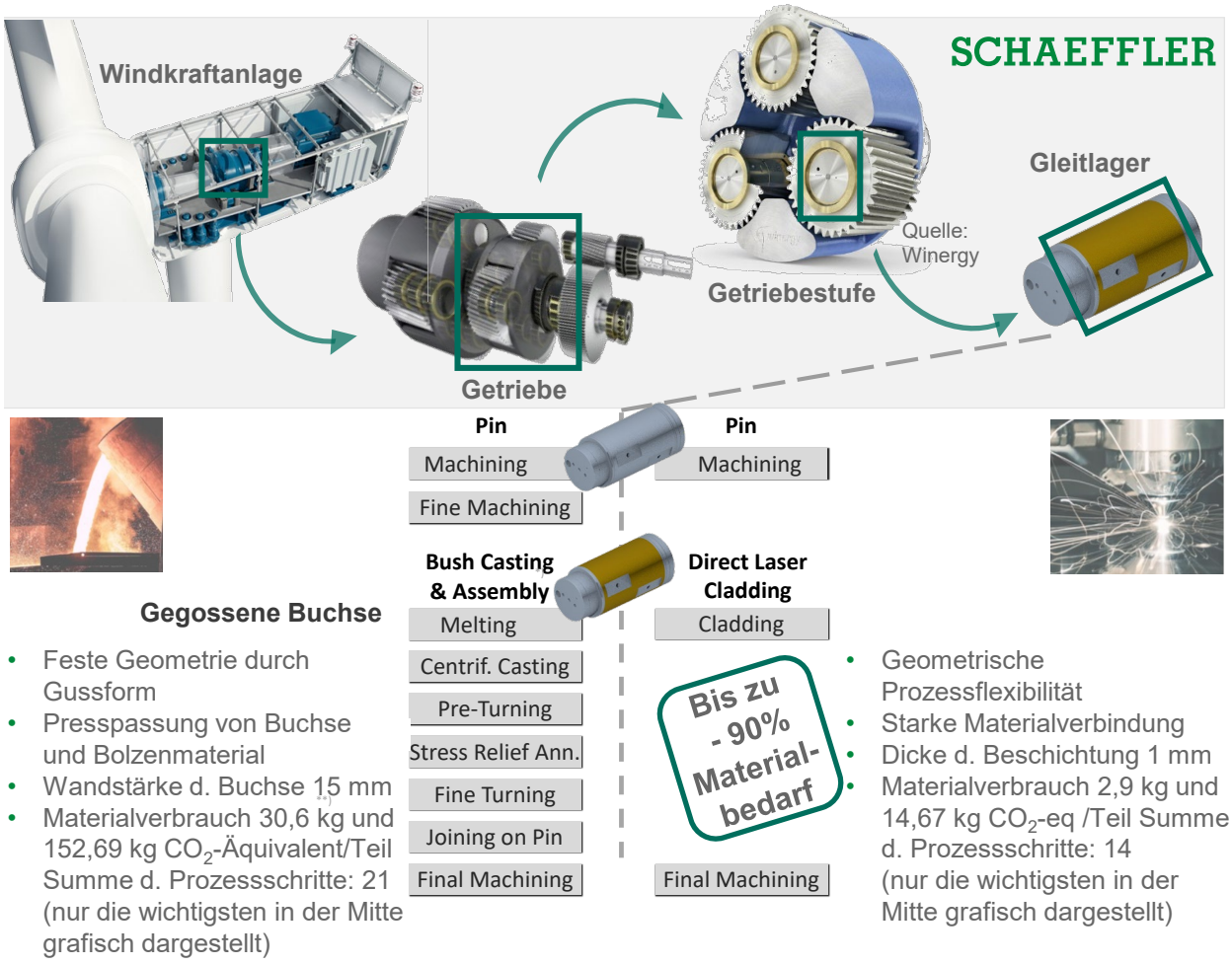


Abbildung 17: Materialeffizienz durch Prozessinnovation und innovative Prozesskette für Getriebekomponenten bei der Schaeffler Gruppe

Das Beispiel zeigt eindrucksvoll, in welchem Maße eine Technologie-/Prozessinnovation und damit verfügbare innovative Prozessketten einen Beitrag zur Steigerung der Produktions- und Materialeffizienz leisten können und welche Rolle sie bei der effektiven Gestaltung der nachhaltigen Wertschöpfung in einer zukünftigen Kreislaufwirtschaft spielen können.

Ein beispielhaftes Szenario eröffnet sich in der Wiederverwendung bei anderen Produktgruppen der Schaeffler Gruppe über einen Repair-Zyklus, bei dem ein mit diesem Verfahren bearbeitetes Bauteil nach einem Abdrehen der verschlissenen Bronzefunktionsschicht, direkt im Nutzungskreislauf geführt, und mit einer erneut aufgebrachten Funktionsschicht wiederverwendet wird. Somit kann die Materialeffizienz über die kumulierbaren Lebenszyklen der Komponenten weiter maximiert werden.

6.2 Materialeffizienz durch Materialoptimierung für Recycling und Kreislaufwirtschaft

Zur Steigerung des Nachhaltigkeitsbeitrags durch die Fertigung stellt neben Maßnahmen zur Lebensdauerverlängerung, also der Funktionalisierungsdauermaximierung, das Recycling von Materialien große Potenziale dar. Durch Materialrecycling werden Materialien dem Stoffkreislauf zugeführt und durch die Nutzung von Sekundärmaterial im Vergleich zur initialen Materialherstellung Primärressourcen, Energie und Emissionen eingespart. Gleichzeitig wird Abfall, der anderenfalls beispielsweise thermisch verwertet würde, vermieden. Somit kann durch das Recycling von Materialien und der Substitution von Neumaterial durch Recyclingmaterial in der Fertigung signifikant zu einer nachhaltigen Produktion beigetragen werden. [21] Im Rahmen des Recyclings von Materialen ist zu beachten, dass insbesondere für die Wiederverwendung von Materialien eine gute Materialtrennung zur Erreichung sortenreiner Materialen erforderlich ist. Die Materialtrennung stellt jedoch aktuell oftmals noch eine große Herausforderung dar. Dies liegt darin begründet, dass heutige Produkte oft aus verschiedenen Materialien und komplexen Verbindungen bestehen, die konstruktionsbedingt schwierig oder nur mit großem Aufwand zu trennen sind. Des Weiteren stellen Verunreinigungen eine Herausforderung dar und erschweren die Materialtrennung. Insbesondere wenn eine automatisierte Trennung nicht möglich ist und manuelle Sortierprozesse erforderlich sind, kann die Materialtrennung sehr kostenintensiv sein. [22], [23]

Eine Möglichkeit, diesen Herausforderungen zu begegnen, ist der vermehrte Einsatz von Monomaterialien in der Fertigung. Monomaterialien bestehen aus einem einzigen Material. Im Gegensatz dazu bestehen viele konservativ erzeugte Produkte aus verschiedenen Materialien, die miteinander verklebt, verschweißt oder anderweitig verbunden sind. Produkte aus Monomaterialien können auch das Risiko von Materialtrennungsfehlern verringern, was die Effizienz von Recyclingprozessen erhöht. Daher werden Monomaterialprodukte als ein wichtiger Bestandteil einer nachhaltigen und kreislauforientierten Wirtschaft gesehen und werden zukünftig in verschiedenen Branchen wie der Verpackungs-, Konsumgüter- und der Bauindustrie eingesetzt. [23] Auch die Produktionsindustrie wird bestenfalls einen kontinuierlichen Wandel bezüglich der einsetzbaren und verfügbaren Materialgruppen erfahren.

Einen vielversprechenden Ansatz für den Einsatz von Monomaterialien verfolgt die Firma Carcoustics. Durch die Verwendung von Monomaterialen als Absorbermaterial im Innenraum von Autos kann die Recyclingfähigkeit der eingesetzten Bauteile gesteigert werden (siehe Abbildung 18). Diese Bauteile können vollständig **einem werkstofflichen Recycling** (III) zugeführt, eingeschmolzen und als hochwertiges Sekundärmaterial wiederverwendet werden. Somit ist keine aufwändige mechanische Materialtrennung für das Recycling von Nöten. Aufgrund des Einschmelzens der Monomaterialien und der Herstellung von Material mit Neumaterialqualität ist keine separate Prozessführung erforderlich, da das Material einfach dem Produktionsprozess wieder zugeführt werden kann. Außerdem nutzt die Fa. Carcoustics zunehmend Recyclingmaterial statt Neumaterial. Eine Beispielanwendung sind akustische Absorber. Hierzu werden Ausschussteile oder prozessbedingte Verschnitte zerschreddert und anschließend als **recycelter Produktionsabfall** für Absorberprodukte genutzt. Beim Produktionsabfallrecycling wird versucht, den bei der Produktion anfallenden Ausschuss und Werkstoffabfälle zu reduzieren und anfallende Reststoffe der Produktion zuzuführen. Dadurch wurde nicht nur die Produktnachhaltigkeit durch Recycling erhöht, sondern zusätzlich konnten auch die akustischen Eigenschaften der Absorber verbessert werden. Es zeigt sich folglich, dass durch Recycling nicht nur ökologische und ökonomische Vorteile realisiert werden können, sondern diese auch mit

einer Steigerung der Bauteilfunktionalität einhergehen können. Bei dieser Art des Materialrecyclings ist allerdings zu beachten, dass die Materialeigenschaften nicht direkt mit Neumaterial zu vergleichen sind, weshalb bei der Prozessführung andere, bisher unbekannte Randbedingungen zu berücksichtigen sind. Beispielsweise muss zur Sicherstellung der Bauteilqualität in diesem Beispiel prozessual sichergestellt werden, dass die zerschredderten Flocken bei der Verarbeitung gleichverteilt sind.

Die Beispiele der Fa. Carcoustics zeigen, dass sich Recyclingmaterial in zahlreichen Anwendungen ohne Qualitätseinbußen für das Endprodukt verwenden lässt. Die Potentiale des Recyclings werden aktuell vor allem aber deswegen noch nicht vollkommen ausgeschöpft, weil es an geeigneten und standardisierten Lösungen mangelt, um die Bauteile bzw. Materialien nach ihrer Nutzung zu sammeln und wieder dem industriellen Kreislauf zuzuführen. Ziel beim Produktrecycling (II) ist es das Produkt im gleichen oder in einem anderen Einsatzbereich beispielsweise mit geringeren Anforderungen weiterverwendet werden, d. h., dass die gleiche Funktionserfüllung gewährleistet ist. Beim **Produktrecycling** wird zwischen Recycling auf Elementebene (Weiterverwendung einzelner Bauteile oder Baugruppen) und Systemebene (Weiterverwendung des gesamten Produktes) unterschieden. Um dieser Herausforderung zu begegnen, bietet die Firma igus im Rahmen des igus Chainge Programmes ihren Kunden die Rücknahme hergestellter und genutzter Energieketten nach der Nutzungsphase an. Das Material wird sortenrein sortiert, gereinigt sowie auf Neuwarenqualität aufbereitet. Im Anschluss wird das Material wieder dem Materialkreislauf zugeführt. Somit werden beim **Element-Produktrecycling** nahezu 100% des Primärmaterials wiederverwendet. In diesem Fall werden nicht nur Energieketten mit gleicher Materialqualität erreicht, sondern auch die CO_2-Emissionen durch einen nachhaltigen Rohstoffkreislauf um 28 % reduziert. [22], [24]

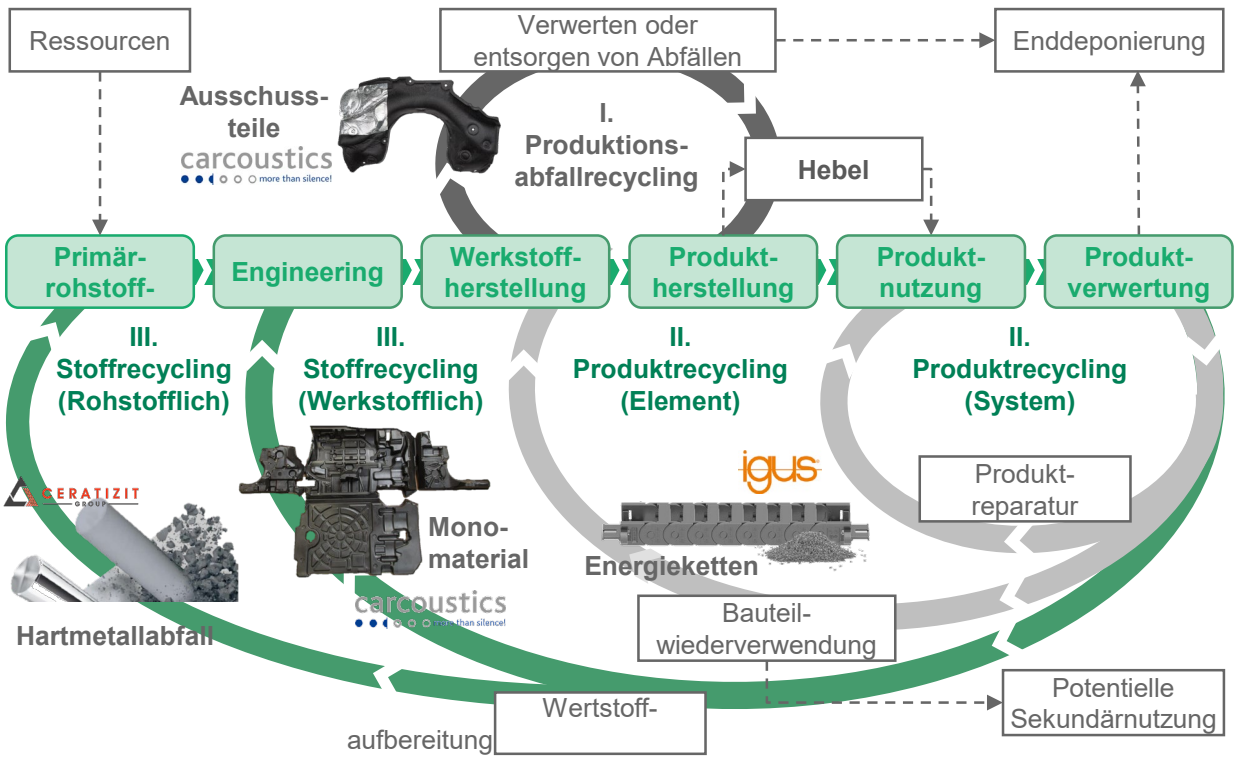


Abbildung 18: Einordnung des Recyclings in den Wertstoffkreislauf

Am Ende der Produktlebensdauer erfolgt die Verwertung der Ausgangsmaterialien des Produkts, das Stoffrecycling (III). Hierbei können die Materialien entweder wieder direkt

der Werkstoffherstellung zugeführt werden oder nach einer thermischen oder chemischen Aufbereitung wieder der Rohstoffherstellung. Neben der Energieeinsparung gegenüber der Herstellung neuer Rohstoffe bietet das Recycling Potenziale zur Reduktion von Rohstoffabhängigkeiten. Die Fa. Ceratizit nutzt diese im **rohstofflichen Recycling** von Hartmetall. Durch die Verwendung von mehr als 99 % an hochwertigen Sekundärrohstoffen (beispielsweise abgenutzte Hartmetallfräser), gesammelt bei Kunden durch einen eigens dafür konzipierten Dienstleistungsservice, können einerseits Rohstoffabhängigkeiten von kritischen Primärrohstoffen (wie z. B. Kobalt) reduziert werden. Zusätzlich werden die CO_2-Emissionen durch den Einsatz innovativer emissionsarmer Produktionsprozesse, nachhaltiger Energiequellen sowie kurzer Transportwege signifikant reduziert. Das Beispiel (s. Abbildung 18) zeigt, dass die Qualität der mittels Sekundärrohstoffen erzeugten Produkte, ermöglicht durch die Nutzung innovativer Prozessoptimierungen oder der Substitution von Prozessrouten, nicht geringer sein muss als bei der Verwendung von Primärrohstoffen.

7 Produktspezifische Optimierung der Produktlebenszyklen mit Hilfe der Fertigung und des Digitalen Zwillings

Wie in den vorherigen Abschnitten dargestellt, existieren verschiedene Ansätze zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz in der Fertigung und bei der Produktnutzung und -wiederverwertung sowie der damit verbundenen CO_2-Emissionen. Dabei wurde auch dargestellt, dass eine lebensphasenübergreifende Betrachtung erforderlich ist, um die mit einem Produkt unmittelbar verbundenen Emissionen ganzheitlich zu bewerten. Dies erfordert nicht nur die Erfassung von lokalen Emissionen in der Fertigung, sondern auch an anderen Stellen wie der Logistik, der Nutzung und der Wiederverwertung. Hinzu kommt, dass eine einseitige Betrachtung der Emissionen die Wirkung von potenziellen "Hebeln" in der Fertigung, die sich positiv oder negativ auf Emissionen in anderen Lebensphasen auswirken, vernachlässigt, stattdessen muss es Ziel sein, die ökologische Gesamtbilanz eines Produkts zu minimieren. Folglich ist es im Falle des Schiffsmotors ökologisch zielführend und auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll, in der Fertigung des Schiffsmotors z. B. durch optimierte Bearbeitungsprozesse oder durch die Anpassung und Weiterentwicklung der Technologien erhöhte CO_2-Emissionen in Kauf zu nehmen, solange dies zu einer entsprechend großen Reduktion der Emissionen über die Produktnutzungsphase führt. Hier kommen auch dem retrofitfreundlichen Produktdesign, der Retrofitfähigkeit und einer bewusst in Kauf genommenen Steigerung der Retrofitgenauigkeit eine besondere Rolle zu (siehe Abbildung 19), da dadurch die Gesamtlebensdauer des Produkts verlängert werden kann. Funktionsoberflächen im Motor beeinflussen dessen Wirkungsgrad. Werden Funktionsoberflächen durch angepasste Fertigungstechnologien gezielt optimiert, so wirken sich diese Maßnahmen auf den Produktbetrieb aus. Durch den signifikant größeren **Hebel des Produktbetriebes** können somit insbesondere MIT der Fertigung Verbesserungen des Gesamtsystems umgesetzt werden. Durch die Funktionsoptimierung des Produkts in der Nutzungsphase können z. B. eine CO_2-Emissionsreduktion oder eine verbesserte Kreislaufwirtschaftsbilanz durch Standzeitverlängerungen erreicht werden. Im Falle des akustischen Absorbers der Fa. Carcoustics ist der Einfluss der Produktnutzungsphase auf Ressourcenverbrauch und Emissionen deutlich geringer als der Einfluss der Produktionsphase. Der Absorber hat keinen Einfluss auf die Lebensdauer des Autos und beeinflusst dessen Eimissionen lediglich durch sein Eigengewicht, welches jedoch sehr gering ist und daher vergleichsweise geringe Hebel zur

Optimierung der Emissionen in der Nutzungsphase bietet. Zwar ist der ökologische Einfluss aufgrund der zu kumulierenden Anzahl an Autos und der darin verbauten akustischen Absorber nicht von der Hand zu weisen, doch liegt der überwiegende Hebel zur ökologischen **Optimierung bei diesem Bauteil in der Herstellungsphase und der Wiederverwendbarkeit** der eingesetzten Materialien.

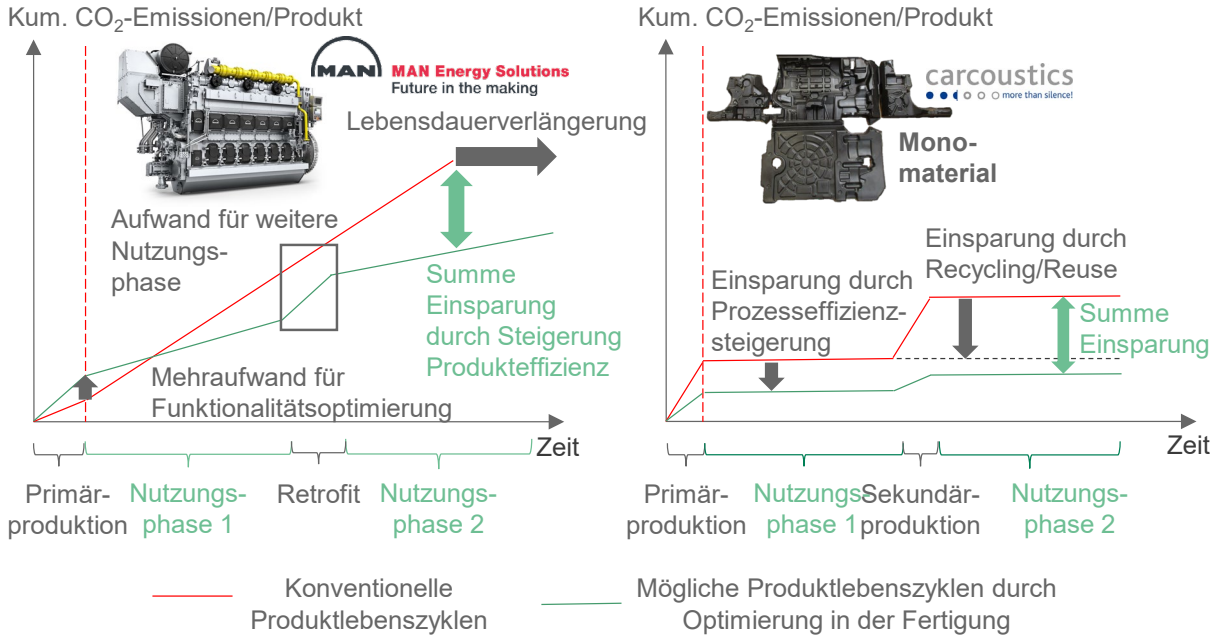


Abbildung 19: Schematisch dargestellte produktindividuelle Hebeleffekte von der Fertigung auf die Emissionen in der Nutzungsphase

Die Beispiele verdeutlichen die Notwendigkeit zur Berücksichtigung vollständiger Produktlebenszyklen, wenn es um die Bewertung der mit dem Produkt verbundenen Emissionen geht. Dabei beginnt der Lebenszyklus eines Produkts mit seiner Konzeption und Entwicklung, worauf die Rohmaterialherstellung, die Fertigung sowie die Distribution und der Transport folgen. Anschließend erfolgt die Funktionserfüllung in der Nutzungsphase des Produkts, welche zusätzlich durch Reparaturmaßnahmen oder weitere Wiederverwertungsansätze verlängert werden kann. Hierin bestehen weitere erhebliche Hebel zur Senkung der CO_2-Bilanz des Produktes. Die **produktspezifischen optimalen R-Szenarien** zu identifizieren setzt eine Ökobilanzierung auf einer geeigneten Datenbasis voraus, es bedarf umfassender Kenntnisse zu den Funktions-/Produkt-/Bauteileigenschaften sowie zur Nutzungsphase (Nutzungsdauer, Lastfälle, etc.). Hier bietet die Anwendung von digitalen Zwillingen hohes Potenzial, da diese eine virtuelle Repräsentation eines realen physischen Objekts, Prozesses oder Systems als digitales Modell abbilden (für weiterführende Informationen siehe Beitrag **Manufacturing for a Circular Economy**). Dieser Zwilling basiert auf Herstellungs- und Nutzungsdaten und -verarbeitungsalgorithmen sowie physikalischen Produkteigenschaften, sodass neben der Replikation des realen Objekts Simulationen für weitere Lebensphasen bzw. Nutzungsszenarien ermöglicht werden. Gleichzeitig können hierdurch mögliche Probleme oder Schwachstellen im Voraus identifiziert und Maßnahmen ergriffen werden, um diese zu beheben, bevor sie zu kostspieligen Ausfällen oder Störungen führen. In diesem Zusammenhang bieten weitreichende **Predictive Quality** Ansätze das Potential, die Lebensdauer von Produkten zu maximieren und gleichzeitig Störungen frühzeitig zu erkennen und ein kritisches Bauteilversagen zu vermeiden. Mit Hilfe des Digitalen Zwillings können außerdem wertvolle **Daten zur**

Optimierung der Recyclingkreisläufe und den Wechselwirkungen zwischen den Kreisläufen identifiziert werden. Der digitale Zwilling stellt somit das Bindeglied zwischen dem vorab prognostizierten Lebenszyklus und der fortwährenden Bewertung und Optimierung der zukünftigen Nutzungsszenarien dar. Zur **Nachhaltigkeitsbewertung über den Gesamtlebenszyklus** kann der **digitale Zwilling** Vorhersagen über die Emissionen in der Lebensphase treffen. In der Gesamtbetrachtung des Lebenszyklus zur Identifikation von Optimierungspotentialen stellt der digitale Zwilling somit zukünftig ein wichtiges Werkzeug zur Verbindung von Produktions- und Nutzungsphase(n) zur CO_2-optimierten Produktauslegung, Fertigung, Nutzung und darauffolgender Umsetzung von R-Szenarien dar.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Fokus fertigender Unternehmen stehen zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit aktuell vor allem die Energie- sowie die Materialeffizienz in der eigenen Produktion. Unternehmen, die hier bereits die Initiative ergriffen haben, heben schon jetzt viele Potentiale zur Energieeinsparung und führen Wertstoffe und Materialien erstmals in Wertstoffkreisläufen. Die breite, erfolgreiche Umsetzung erfordert jedoch den Einsatz von allen Beteiligten entlang der jeweiligen Wertschöpfungsketten sowie den Austausch unter den Beteiligten. Daher wurden im vorliegenden Beitrag aktuelle Best-Practices zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz in der Fertigung vorgestellt, die aktuell bereits bei und mit OEMs, Komponenten- und Maschinenherstellern, Betriebsmittellieferanten sowie Herstellern von Sensor- und Monitoringsystemen umgesetzt werden. Der Fertigung kommt als Befähiger zukünftig eine tragende Rolle bei der Produktion nachhaltigerer Produkte zu. Sowohl in der Fertigung als auch auf Basis der mit der Fertigung erzielten Steigerungen der Produktwirkungsgrade, -funktionalitäten sowie Energie- und Materialeffizienzsteigerungen kann ein signifikanter Beitrag zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft geleistet werden. Die dargestellten Beispiele zeigen, wie sowohl Einzelmaßnahmen aber auch Maßnahmen auf Grundlage einer datenbasierten Transparenz in Summe den Weg zu einer nachhaltigeren Produktion und Gesellschaft ebnen können. Dabei spielen die Steigerung der Effizienz von Maschinen und deren Peripherie, Prozessinnovationen aber auch das Produktdesign, die eingesetzten Werkstoffe und Materialien jeweils eine wichtige Rolle. Die methodische Basis zur Bewertung geeigneter Maßnahmen legt die Ökologiebewertung. Die dafür notwendigen Daten können heute innerhalb der Fertigung oftmals bereits erfasst und genutzt werden. Im Hinblick auf die Realisierung von produktspezifisch sinnvollen R-Szenarien zur Realisierung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft besteht jedoch zunehmend Bedarf an Produktinformationen auch aus den weiteren Lebensphasen eines Produkts. Hier bietet zukünftig das Konzept des Digitalen Zwillings einen vielversprechenden Ansatz zur Zusammenführung und Verarbeitung aller relevanten Prozess- und Produktdaten, so dass mittel- bis langfristig eine kreislaufbasierte Wirtschaft in der Produktion für eine nachhaltige Gesellschaft realisiert werden kann.

9 Literatur

[1] Statista Research Department. „Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren des Klimaschutzgesetzes in den Jahren 1990 bis 2021 und Prognose für 2030 (in Millionen Tonnen CO2-Äquivalent).” de.statista.com. https://de.statista.com/statistik/daten/studie1241046/umfrage/treibhausgasemissionen-in-deutschlandnach-sektor/?locale=de (Zugriff am: 28. Feb. 2023).

[2] P. R. Shukla *et al.*, „Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,“ 2022. Zugriff am: 13. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ipcc.ch/reportar6/wg3/downloads/report/IPCCAR6_WGIII_FullReport.pdf

[3] D. Frans, J. Rabe, Y. Ruf und D. Koroleva. „Sechs Bereiche, in denen Unternehmen ihre Emissionen zügig reduzieren können.” rolandberger.com. https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Mehr-Tempo-bei-der-Dekarbonisierung.html (Zugriff am: 28. Feb. 2023).

[4] IHK München und Oberbayern. „Nachhaltigkeitsberichterstattung.” ihk-muenchen.de. https://www.ihk-muenchen.de/de/Service/Nachhaltigkeit-CSR/Nachhaltigkeitsberichterstattung/ (Zugriff am: 28. Feb. 2023).

[5] M. A. M. Wühr und C. Otto. „ESG-Ratings für Automobilzulieferer: Keine Pflicht und dennoch ein Muss.” automobil-industrie.vogel.de. https:/www.automobil-industrie.vogel.de/esg-ratings-fuer-automobilzulieferer-keine-pflichtund-dennoch-ein-muss-a-1116812/ (Zugriff am: 28. Feb. 2023).

[6] G. Grünert, „CO2-Bilanzierung für die Schleiftechnik - Herausforderungen und Chancen,” präsentiert auf der Schleiftagung 2023, Fellbach, 25.-26. Jan. 2023.

[7] *DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020*, 14040:2021-02, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2006.

[8] *DIN EN ISO 14044:2021-02, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020*, 14044:2021-02, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2018.

[9] „Methodensammlung zur Nachhaltigkeitsbewertung: Grundlagen, Indikatoren, Hilfsmittel,“ L. Andes, Karlsruhe, 2019. Zugriff am: 28. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oew.kit.edu/downloads/Methodensammlung%20zur%20Nachhaltigkeitsbewertung.pdf

[10] M. A. J. Huijbregts *et al.,* „ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,“ *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 22, Nr. 2, S. 138–147, 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.

[11] A. Beckers *et al.,* „Digitalized manufacturing process sequences – foundations and analysis of the economic and ecological potential,“ *The CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Jg. 39, S. 387–400, 2022, doi: 10.1016/j.cirpj.2022.09.001.

[12] Topmotors.ch. „Teillastfaktor: Auswirkung von Teillast: Messung + Ausrüstung – Merkblatt 9.“ topmotors.ch. https://www.topmotors.ch/sites/default/files/2018-08/D_MB_09_Teillastfaktor.pdf (Zugriff am: 28. Feb. 2023).

[13] J. Falker, „Spindeltechnik und Digitalisierung als Wegbereiter für mehr Effizienz und Nachhaltigkeit beim Schleifen," präsentiert auf der Schleiftagung 2023, Fellbach, 25.-26. Jan. 2023.

[14] W. Karassik, „Green Deal beim Schleifen," präsentiert auf der Schleiftagung 2023, Fellbach, 25.-26. Jan. 2023.

[15] F. Klocke, *Fertigungsverfahren 2: Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide* (VDI-Buch). 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.

[16] R. Stabauer, „Bedarfsminimierter Kühlschmierstoffeinsatz beim Schleifen," präsentiert auf der Schleiftagung 2023, Fellbach, 25.-26. Jan. 2023.

[17] A. Dehmer, „Projekt 4 – Optimierte Kühlstrategie beim Hartmetall-Werkzeugschleifen," 2019, unpubliziert.

[18] D. Wilke, „Ressourceneinsparung und Qualitätsverbesserung durch innovative Öl-Rekonditionierung," präsentiert auf der Schleiftagung 2023, Fellbach, 25.-26. Jan. 2023.

[19] R. Greschert, *Ausbildung tragfähigkeitssteigernder Grenzschichten in der Zahnradfertigung* (Ergebnisse aus der Produktionstechnik 10/2019). Aachen: Apprimus, 2019.

[20] T. Bergs, „Funktionsoptimierte Schleifbearbeitung von Antriebskomponenten," präsentiert auf der Schleiftagung 2023, Fellbach, 25.-26. Jan. 2023.

[21] E. Feess und E. Günther. „Recycling." https://wirtschaftslexikon.gabler.de/defini-tion/recycling-44989/version-268290 (Zugriff am: 10. Mär. 2023).

[22] M. Stumpfe. „Probleme fürs Plastik-Recycling." ardalpha.de. https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/nachhaltigkeit/recycling-kunststoffe-plastikmuell-plastik-100.html (Zugriff am: 18. Mai 2018).

[23] T. Lucht, M. Hübner und P. Nyhuis, „Effiziente Auftragsabwicklung im Metall-Recycling: Herausforderungen und Maßnahmen am Beispiel des Aluminium-Recyc-lings," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 115, Nr. 9, S. 606–611, 2020, doi: 10.1515/zwf-2020-1150914.

[24] A. Mohsseni, *Gestaltung von lebenszyklusrobusten Produktarchitekturen am Beispiel des Lithium-Ionen-Batteriesystems* (Ergebnisse aus der Elektromobilproduktion 15). Aachen: Apprimus, 2021.

Die Inhalte für den Vortrag 2.2 erarbeiteten die Autor:innen mit weiteren Expert:innen in dieser Arbeitsgruppe:

Dr.-Ing. Thorsten Augspurger, Makino Europe GmbH, Kirchheim unter Teck
Dr.-Ing. Sebastian Barth, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Serhan Bastürk, Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
Alexander Beckers, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Frank Benner, B+T GmbH & Co. KG, Hüttenberg
Prof. Dr.-Ing.Thomas Bergs, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen
Jens Brimmers, WZL | RWTH Aachen, University, Aachen
Alexander Dehmer, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Michael Duscha, Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
Dr.-Ing. Dirk Friedrich, Grindaix GmbH, Kerpen
Gerhard Fuchs, BMW AG, München
Gonsalves Grünert, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Astrid Heckl, Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach
Tim Hommen, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Herbert Johann, ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen
Lars Johannsen, Carcoustics Shared Services GmbH, Leverkusen
Anna Koch, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Magnus Orth, igus GmbH, Köln
Dr. Roberto Perez, GF Machining Solutions GmbH, Schorndorf
Sebastian Prinz, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Tobias Röthlingshöfer, EMAG Maschinenfabrik GmbH, Salach
Jannik Röttger, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr. Uwe Schleinkofer, Ceratizit Austria GmbH, Breitenwang, Österreich
Joachim Seele, GF Machining Solutions GmbH, Schorndorf
Lars Stauder, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Michael Terhorst, Carcoustics TechConsult GmbH, Leverkusen
David Welling, Makino Europe GmbH, Kirchheim unter Teck
Jan Wiese, WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH, Aachen
Dr.-Ing. Christoph Zeppenfeld, MAN Energy Solutions SE, Augsburg

2.3 Skalierbare Produktion von Energiespeichern

C. Brecher, H. Janssen, D. Zontar, M. Kersting, S. Rieck, K. Bär, T. Bastuck, S. Witt

Gliederung

1 Einleitung 186
1.1 Energiespeicher und deren Anwendung 186
2 Produktion von Batterien und H_2-Systemen 189
2.1 Stand der Technik - Batterieproduktion 190
2.2 Stand der Technik – H_2 Systeme 192
3 Verbesserungen einzelner Prozesse und Produktionslinien 195
3.1 Optimierung von Konvektionstrocknung 196
3.2 Neuartige strahlungsbasierte Trocknungsverfahren 197
3.3 Effiziente Assemblierung von Batteriepacks 199
3.4 Direktbeschichtung von CCMs für PEMFCs und PEMELs 200
4 Entwicklung von Produktionslinien der nächsten Generation 203
4.1 Neuartige Batterieproduktion 204
4.2 Zukünftige Produktion von H_2-Systemen 205
4.3 Die Datenwertschöpfungskette in der Energiespeicherproduktion 207
5 Zusammenfassung und Fazit 208
6 Literatur 210

doi: 10.24406/publica-963

Kurzfassung

Skalierbare Produktion von Energiespeichern

Die Produktion von Energiespeichern, insbesondere von Batterien und Brennstoffzellen, ist ein wachsender Markt in Europa, der für Maschinenlieferanten neue Marktchancen eröffnet. Die Produktion von LIB-Zellen besteht aus der Elektrodenherstellung, Zellmontage und dem Zellfinishing. Die Produktion zukünftiger Zellformate und Zellchemien ist aufgrund von wenig Synergien zur aktuellen LIB-Produktion schwierig und erfordert weiterhin Forschungsarbeiten, um Prozesse zu optimieren und zu verschlanken. Unabhängig von der Entwicklung der Prozesse für morgen besteht ein hoher Innovationsbedarf konventioneller Produktionsprozesse. Ein möglicher Lösungsansatz ist die datengetriebene Produktionsoptimierung. Im Bereich der PEMFC und PEMEL ist die Produktion noch nicht hochvolumenfähig, jedoch besteht eine hohe Nachfrage nach Technologien zur Skalierung. Ein aktuelles Hemmnis zur schnelleren Skalierung besteht im Übertrag der katalytischen Schichten von Decal-Trägerfolien auf die Membran. Lösungsansätze werden in direkten Beschichtungsverfahren und flexiblen Maschinenkonzepten gesehen. Insgesamt lässt sich feststellen, dass es zahlreiche Forschungsansätze gibt, um die vorhandenen Produktionsanlagen zu verbessern und damit einen globalen Mehrwert zu erzeugen. Insbesondere ist eine Überführung in die produzierende Industrie notwendig, um Produktionslinien der nächsten Generation aufbauen zu können, die einen Wettbewerbsvorteil sicherstellen. Zur Maximierung der Produktqualität und Zuverlässigkeit der Anlagen, ist es notwendig bei der Entwicklung auf Wissen und Modelle, basierend auf an bestehenden Anlagen und Forschungsausrüstungen akquirierten Daten zurückzugreifen. Die europäische Industrie kann während des Markthochlaufs kurzfristig an der Wertschöpfung im Bereich der Energiespeicherproduktion partizipieren, indem bestehende, zugekaufte Anlagentechnik verwendet wird. Langfristig ist eine Weiterentwicklung oder der Aufbau eigenentwickelter Produktionsmaschinen notwendig, um die nächsten Generationen von Energiespeicherkomponenten und Systemen wettbewerbsfähig produzieren zu können.

Schlagwörter: Energiespeicher, Batterien, Brennstoffzellen, Elektrolyseure , Datenwertschöpfungskette

Abstract

Scalable Production of Energy Storage Systems

The production of energy storage devices, especially batteries and fuel cells, is a growing market in Europe, which opens new market opportunities for machine suppliers. The production of LIB cells consists of electrode manufacturing, cell assembly and cell finishing. Production of future cell formats and cell chemistries is difficult due to little synergy with current LIB production and requires research to optimize and streamline processes. Regardless of the development of processes for tomorrow, there is a high need for innovation of conventional production processes. One possible solution is data-driven production optimization. In the area of PEMFC and PEMEL, production is not yet high-volume capable, but there is a high demand for technologies to scale up. A current barrier to faster scaling is the transfer of catalytic layers from decal support films to the membrane. Viable solutions are seen in direct coating processes and flexible machine concepts. Overall, it can be concluded that there are many research approaches to improve existing production equipment and thus generate global added value. A transfer to the manufac-

turing industry is necessary to build next generation production lines that ensure a competitive advantage. To maximize the quality of the product and reliability of the assets, it is imperative to draw on knowledge and models derived from data acquired at existing plants and research equipment. During the market ramp-up, European industry can take part in the value creation in the field of energy storage production in the short term by using existing, bought plant technology. In the long term, further development or the construction of in-house developed production machines is necessary to be able to produce the next generations of energy storage components and systems competitively.

Keywords: Energy storage, batteries, fuel cells, electrolyzer

1 Einleitung

Der Bedarf an erneuerbaren Energien wird von verschiedenen Faktoren angetrieben. Ein wesentlicher Treiber ist das gestiegene Bewusstsein für die globale Erwärmung. Internationale Vorschriften sind in Kraft getreten, um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, die bekanntermaßen einen erheblichen Einfluss auf den Klimawandel haben. Im Rahmen ihrer ehrgeizigen Ziele zur Verringerung der Treibhausgasemissionen hat sich die Europäische Union (EU) darauf geeinigt, die Treibhausgasemissionen (THG) bis zum Jahr 2030, um bis zu 40 % zu reduzieren. Da die Nutzung fossiler Brennstoffe THG-Emissionen verursacht, wirken sich die staatlichen Vorschriften und Maßnahmen direkt auf die Verbraucher fossiler Brennstoffe aus, z. B. auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (engl.: ICE, internal combustion engine) und Kraftwerke, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden [1].

Die Reduzierung der Anzahl von Verbrennungsmotorfahrzeugen gilt als ein Hebel für die Verringerung der THG-Emissionen. Zusätzlich zu den Umweltschäden durch THG-Emissionen werden auch Gesundheitsschäden durch die Emission von Schadstoffen wie Stickoxiden (NO_x) verursacht. Da insbesondere städtische Regionen unter der Luft- und Lärmbelastung durch ICE-Fahrzeuge leiden, führen immer mehr Städte Fahrverbote für bestimmte ICE-Fahrzeuge ein. Ein Neuzulassungsverbot für Verbrenner wurde für 2035 beschlossen [2]. Darüber hinaus regulieren Regierungen auf der ganzen Welt nicht nur das Fahren von Verbrennungsmotoren durch Steuern und Verbote, sondern fördern gleichzeitig die Elektrifizierung von Fahrzeugen. Der Trend im Mobilitätssektor hin zu elektrischen Antrieben zeigt sich in der stetig wachsenden Zahl von Elektro- (BEV), Plug-in-Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV). Im Jahr 2021 wurde die Marke von 17 Millionen Elektroautos weltweit überschritten und hat sich damit um das 1,7-fache erhöht [3]. Diese Nachfrage nach Elektrofahrzeugen treibt das Interesse und die Investitionen in die Entwicklung und Herstellung mobiler Energiespeichertechnologien voran. Dazu gehören neben Batteriespeichern auch Wasserstoff-Brennstoffzellen insbesondere für Nutzfahrzeuge. Im Jahr 2030 werden mehr als 1 Mio. FCEV produziert werden [4].

Für einen erfolgreichen Umstieg auf erneuerbare Energien ist es entscheidend, die Kostenlücke zwischen elektrischen und konventionellen Lösungen für stationäre und mobile Energiespeicher und Energiewandler zu schließen und die spezifischen technischen Anforderungen der verschiedenen Anwendungen zu erfüllen. Entscheidende Hebel zur Kostenreduktion in der Produktion sind die Skalierung hin zu hohen Stückzahlen sowie die Effizienzsteigerung einzelner Fertigungsprozesse.

Der steigende Bedarf an Energiespeichern stellt eine große Chance und gleichzeitig Herausforderung für den Maschinen- und Anlagenbau sowie die verarbeitende Industrie dar. Diese bestehen unter anderem in dem starken Marktwachstum während der Phase des Markthochlaufs bei gleichzeitig kurzen Entwicklungszyklen nächster Produktgenerationen, die neuartige Herstellprozesse erfordern. Damit Unternehmen eine fundierte Entscheidung über neue strategische Ausrichtungen und Investitionen treffen können, ist eine detaillierte Auseinandersetzung mit den verschiedenen technologischen Optionen für mobile Energiespeicher unerlässlich. Ebenso wichtig ist die Entwicklung neuartiger Produktionsprozesse, um zukünftig wettbewerbsfähig zu sein.

1.1 Energiespeicher und deren Anwendung

Von den verschiedenen technologischen Optionen für klimaneutrale, mobile Energiespeichertechnologien weisen Batterien derzeit den größten Marktanteil auf. Insbesondere Li-

thium-Ionen-Batterien (LIBs) werden in Anwendungen wie batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen (BEVs) eingesetzt. Aber auch andere Speicher- und Wandlertechnologien wie Festkörperbatterien (SSB, Solid-State Batterie), oder Brennstoffzellen (FCs) müssen zukünftig verstärkt in Betracht gezogen werden.

Die verschiedenen Technologien weisen spezifische Eigenschaftsprofile auf und unterscheiden sich in ihrer technologischen Reife, ihres Marktpotenzials für verschiedene Anwendungen und der erforderlichen Produktionsprozesse. Daher werden die wesentlichen Technologien im Folgenden kurz erläutert:

Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) sind elektrochemische Energiespeicher, die in der Lage sind, chemische Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Je nach Verwendung und spezifischem Design einer LIB kann ihre Lebensdauer mehrere tausend Lade- und Entladezyklen erreichen.

Einzelne LIB-Zellen gibt es in drei verschiedenen Formaten: zylindrische Zellen, prismatische Zellen und Pouchzellen. Eine LIB-Zelle hat zwei Elektroden: die Kathode, die durch die Reduktion während der Entladephase definiert ist, und die Anode. LIBs unterscheiden sich je nach den für die Anode und die Kathode verwendeten Materialien [5]. Die Kathode ist auf Lithiumbasis und die Anode ist herkömmlich aus Kohlenstoffmaterialien wie Graphit aufgebaut. Zwischen den Elektroden befinden sich ein flüssiger, ionenleitender Elektrolyt und eine Trennschicht zur Isolierung der Elektroden. Beide Elektroden sind auf einem Stromkollektor beschichtet.

Abbildung 1: Exemplarische Abbildung einer prismatischen Zelle der Fraunhofer FFB (Quelle: Fraunhofer FFB)

Um die geforderte elektrische Leistung zu erreichen, werden mehrere Zellen in Reihe (Erhöhung der Spannung) oder parallel (Erhöhung des maximalen Entladestroms) geschaltet. Zusammengeschaltete Zellen werden zu einem Modul zusammengefasst und mehrere Module bilden wiederum ein Batteriesystem, auch Batteriepack genannt. Das komplette Batteriesystem umfasst diese Batteriemodule sowie elektrische und mechanische Komponenten wie Gehäuse, Isolierung, Kühlung, Befestigungen und das Batteriemanagementsystem (BMS) [6].

Was die Energiedichte betrifft, so decken LIBs einen Bereich von 230 bis 300 Wh/kg ab. Für die Zukunft werden Werte von bis zu 360 Wh/kg erwartet [7]. LIBs werden als Stromversorgung für tragbare elektronische Geräte und BEV sowie im stationären Bereich eingesetzt. Es wird erwartet, dass die weltweite Nachfrage nach diesen Produkten weiter

steigen wird [8]. Wann die LIB-Technologie von SSB abgelöst wird, ist zurzeit noch Diskussionsgegenstand. Daher wird für die produktionstechnologischen Herausforderungen im weiteren Verlauf die LIB-Technologie exemplarisch behandelt. Die Überführung der Ergebnisse auf SSB ist jedoch bereits zu berücksichtigen.

Eine **Brennstoffzelle (FC)** wandelt die chemische Energie eines Brennstoffs, hier Wasserstoff, in elektrische Energie um. Im Allgemeinen bestehen FCs aus zwei Endplatten und einer Reihe von dazwischen geschalteten Zellen. Der Aufbau des Stapels und seiner Komponenten hängt von der Art der FC ab.

Je nach Betriebstemperatur werden FCs in Nieder-, Mittel- und Hochtemperatur-FCs unterteilt. Eine weitere Unterscheidung ist nach der Art des verwendeten Elektrolyten möglich. Gängige FCs sind die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) und die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEMFC) [9]. Die Art und Weise, wie ein FC-System betrieben werden kann, wird durch seine Eigenschaften charakterisiert, welche zwischen den verschiedenen FC-Typen variieren: Bei FCs mit niedriger bis mittlerer Betriebstemperatur kann die Vorwärmzeit vor dem Betrieb verkürzt werden. Dadurch werden aufwändige Wärmemanagementsysteme vermieden und eine kurze Anlaufzeit ermöglicht. Die hohe Energiedichte von Wasserstoff führt zu einem geringen Systemgewicht im Vergleich zu Batteriesystemen.

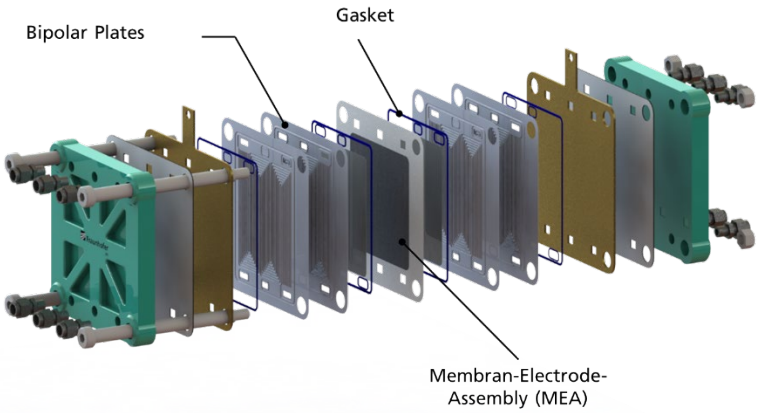


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines PEMFC Stacks (Quelle: Fraunhofer IPT)

Als Beispiel für Niedertemperatur-Brennstoffzellen ist in Abbildung 2 der Aufbau der PEMFC gezeigt. Eine einzelne Zelle besteht aus einer Bipolarplatte (BPP), der Dichtung, den Gasdiffusionsschichten (engl.: GDL) und der Membranelektrodeneinheit (engl.: MEA). Die MEA besteht aus zwei Elektroden, die jeweils mit einem Katalysator beschichtet sind, und einer Polymerelektrolytmembran (PEM) in der Mitte der Zelle [10]. Diese Zellen werden zu hunderten gestapelt, um die gewünschte Leistung zu erhalten. Solche Zellstapel werden als Stacks bezeichnet.

Wesentlicher Vorteil von Wasserstofftechnologien ist, dass sie eine Sektorenkopplung, bspw. zwischen Industrie, Mobilität und Energiewirtschaft ermöglicht. In den letzten Jahren ziehen Automobilhersteller und -zulieferer FCs zunehmend als mögliche Technologie für den Antrieb von Nutzfahrzeugen in Betracht. Drei wesentliche technische Anforderungen prägen die Anwendung im Verkehr:

- Kurze Anlaufzeit (niedrige Betriebstemperatur)
- Hoher Wirkungsgrad
- Hohe volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte [11], [12].

Aufgrund ihrer Fähigkeit zum diskontinuierlichen Betrieb sind PEMFCs die am besten geeignete Art von FC für die Anwendung im Transport- und Mobilitätsbereich [13]–[16]. Die PEMFC kann je nach technischen Anforderungen, wie z.B. Ausgangsleistung oder geometrischer Größe, für unterschiedliche Anwendungen ausgelegt werden. Dies ermöglicht den Einsatz von FCs als Lösung für emissionsfreie Mobilität sowohl für PKWs als auch für LKWs und Busse. FCEV ermöglichen hohe Reichweiten bei kurzen Betankungszeiten von nur wenigen Minuten.

Der notwendige grüne Wasserstoff kann zukünftig insbesondere mittels Elektrolyse erzeugt werden. Ein **Elektrolyseur (EL)** besteht aus mehreren hundert Zellen, welche von den Endplatten eingeschlossen werden [17]. Wie bei den FCs gibt es verschiedenen Bauarten der ELs, welche sich im Wesentlichen in Alkalische Elektrolyseure (AEL), Polymer Elektrolyt Elektrolyseure (PEMEL) und Fest Oxid Elektrolyseure (SOEL) unterteilen lassen. Analog zu der Brennstoffzelle ist auch hier der PEMEL das dynamischste System mit einer hohen Energiedichte. Zusätzlich sind die Produktionsprozesse von PEMEL und PEMFC vergleichbar. Nachfolgend wird daher auf den PEMEL eingegangen. Die Zellen bestehen im Wesentlichen aus immergleichen Bauteilen: der Bipolarplatte (BPP), der Membran-Elektroden-Einheit (engl.: MEA) und den Dichtungen [18]. Technoökonomische Betrachtungen haben gezeigt, dass insbesondere die mit Katalysator beschichtete Membran (CCM) als Teil der MEA einen großen Anteil an den Gesamtkosten des Stacks hat und ein großes Skalierungspotential aufweist. Abhängig von Systemleistung und Produktionstechnologien kann durch eine Stückzahlsteigerung der Preis um ein sechsfaches reduziert werden [17], [19]. Die beiden wesentlichen Funktionen der CCM in PEM-Systemen sind die Beschleunigung der chemischen Reaktion durch Edelmetalle an den Elektroden sowie die Leitung der Wasserstoffprotonen durch die Membran.

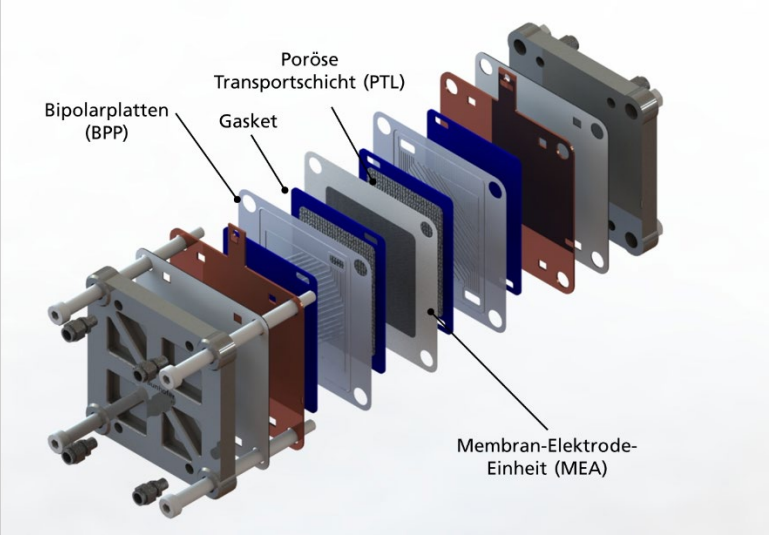


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines PEMEL Stacks

2 Produktion von Batterien und H_2-Systemen

Die Produktion von Energiespeichern hat in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung erlebt. Insbesondere die Produktion von LIBs hat sich zu einem großen Wirtschaftszweig

entwickelt. Immer mehr Firmen richten ihr Portfolio außerdem auf die Entwicklung und Produktion von PEMFC aus. Elektrolyseure werden aktuell noch in kleineren Stückzahlen produziert, stehen aber an der Schwelle zur Hochratenproduktion.

Um eine hohe Effizienz und Qualität zu erreichen, setzen Hersteller von Energiespeichern auf Automatisierung und Digitalisierung in der Produktion. Durch den Einsatz von Robotern, Künstlicher Intelligenz und neuartigen Prozesstechnologien werden Produktionsprozesse optimiert und automatisiert.

Ein wichtiger Aspekt bei der Produktion von Energiespeichern ist auch die Nachhaltigkeit, da diese Produkte oft einen hohen Material- und Ressourceneinsatz verlangen. Immer mehr Hersteller setzen auf umweltfreundliche Materialien und Produktionsprozesse, um den ökologischen Fußabdruck zu reduzieren. Es wird zum Beispiel versucht, den Einsatz von seltenen und teuren Rohstoffen wie Kobalt oder Platin zu minimieren und durch nachhaltigere Alternativen zu ersetzen.

Zudem spielt die Skalierbarkeit der Produktion eine große Rolle. Hersteller müssen in der Lage sein, die Produktion schnell und effektiv an eine steigende Nachfrage und wechselnden bzw. sich entwickelnde Produkte anzupassen, um am Markt erfolgreich zu sein. Neben der Produktion von Energiespeichern für den Fahrzeug- und Transportsektor wird auch die stationäre Speicherung von erneuerbaren Energien immer wichtiger.

2.1 Stand der Technik - Batterieproduktion

Obwohl die Batterieproduktion bereits hochskaliert ist, müssen neue Trends berücksichtigt werden, die Herausforderungen in der Flexibilität der Prozesse mit sich bringen. Einerseits erfordern neue Produktgenerationen und Veränderungen innerhalb der vorherrschenden Batteriesysteme Veränderungen in der gesamten Produktionskette, wie zum Beispiel All-Solid-State-Batterien (ASSB) oder Natrium-Ionen Zellen. Andererseits erfordern zukünftige Anforderungen an Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit Innovationen innerhalb der derzeit dominierenden Produktionsprozesse für LIBs. Diese Veränderungen schaffen Marktchancen für den Maschinen- und Anlagenbau. Bis zum Jahr 2030 wird ein Wachstum der Batterieproduktionskapazität in Europa von mehr als 1300 GWh prognostiziert. (vgl. Abbildung 4) [7].

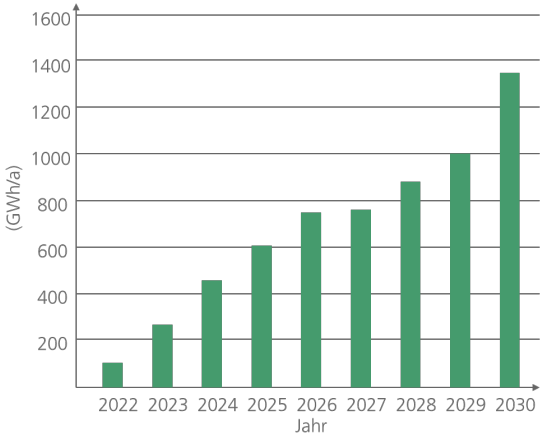


Abbildung 4: Prognostiziertes Wachstum der Batterieproduktionskapazität in Europa nach [7]

Die Herstellung von LIB-Zellen ist ein komplexer Prozess, der aus drei übergeordneten sich beeinflussenden Schritten besteht: der Elektrodenherstellung, Zellassemblierung und dem Zellfinishing [20]. Während die Elektrodenherstellung und das Zellfinishing unabhängig vom Zellformat sind, unterscheiden sich die Prozessschritte innerhalb der Zel-

lassemblierung für die drei relevanten Zellformate Pouchzelle, zylindrische Zelle und prismatische Zelle. Im Folgenden werden die etablierten Produktionsschritte einer Pouchzelle exemplarisch beschrieben.

Die Elektrodenherstellung beginnt damit, dass die Aktivmaterialien, die auf Anode und Kathode aufgebracht werden sollen, entsprechend der Zellrezeptur mit Leitruß, Lösungsmitteln, Bindemitteln und Additiven vermischt werden. In der Regel wird dieser Prozess chargenweise und nicht kontinuierlich durchgeführt. Die Beschichtungsmaterialien werden danach mit einem Beschichtungswerkzeug, wie beispielsweise einer Schlitzdüse oder einem Rakel, in einem nassen Prozess auf die Kollektorfolien (Anode: Kupfer; Kathode: Aluminium) aufgetragen. Um die Lösungsmittel zu entfernen, werden die beschichteten Elektrodenfolien durch einen Trockenofen geführt. Beschichtung und Trocknung sind eng miteinander verbunden und oft in einer Maschine integriert. Im anschließenden Prozessschritt des Kalandrierens werden die beschichteten Kupfer- und Aluminiumfolien über rotierende Walzenpaare verdichtet, um die gewünschte Porosität einzustellen. Das Längsteilen beschreibt einen Schneidprozess, bei dem ein breites Elektrodencoil (Mutterrolle) in mehrere kleinere Elektrodencoils (Tochterrollen) geteilt wird. Um die Restfeuchte zu entfernen, werden die Elektrodenstreifen auf einen speziellen Materialträger gerollt und in einen Vakuumofen geführt. Beim Trennen werden die einzelnen Elektroden der Anoden- und Kathodenfolien von den Coils abgetrennt, z.B. mit Hilfe eines Stanzwerkzeugs.

Der anschließende Stapelvorgang erfordert eine hohe Positioniergenauigkeit. Gleichzeitig müssen Beschädigungen während der Handhabung vermieden werden. Die beidseitig beschichteten Bleche werden in der wiederkehrenden Reihenfolge Anode-Separator-Kathode-Separator-Anode-etc. gestapelt. Die gestapelten Kollektorfolien werden dann mit den Zelllaschen kontaktiert (z. B. durch Laserschweißen). Unter Konfektionierung versteht man das Einlegen des Zellstapels in die tiefgezogene Aluminiumfolie und das Versiegeln der Pouchzelle (z. B. durch Impulssiegelung). Nach dem Versiegeln wird die Zelle mit Flüssigelektrolyt befüllt, in der Regel mit einer hochpräzisen Dosiernadel, während die Zelle im Wechselbetrieb mit Argon oder im Vakuum beaufschlagt wird. Im Rahmen des Zellfinishing finden neben der Erstaktivierung der Zelle und der Bildung der SEI-Schicht auch die abschließenden Prüfprozesse statt. Eine zusammenfassende Übersicht über den Produktionsprozess ist in Abbildung 5 dargestellt. [20]–[22].

Nach der Zellproduktion können die Zellen in Module verpackt werden, welche anschließend in so genannte Packs assembliert werden. Die Packs werden als Bauteil in z.B. PKWs verbaut und müssen mechanische, thermische und chemische Einflüsse der Umwelt von den Batterien fernhalten. Die hohe Lebensdauer wird häufig durch Gehäuse aus Metall- oder Faserverbundwerkstoffen gewährleistet, welche mit einem Deckel und entsprechender Dichtung versehen sind.

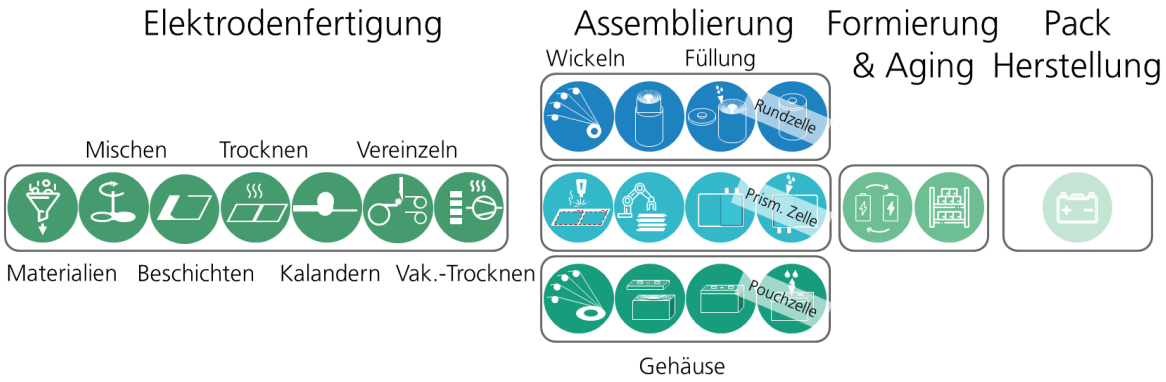


Abbildung 5: Übersicht über den Produktionsprozess einer LIB

Kommerziell verfügbare Maschinen und Linienkonzepte ähneln sich stark bezüglich der Abfolge der Prozesse und der benutzten Technologien. So wird z. B. jede Anlage mit einem klassischen Konvektionstrockner ausgestattet, der aufgrund der hohen Bahngeschwindigkeiten von bis zu 100 m/min und der benötigten Verweilzeit von bis zu 1 min mit Abstand die größte Maschine (~100 m) in der ganzen Fertigung ist. Unabhängig vom Platzbedarf ergeben sich auch enorme Energiebedarfe. Innerhalb der Elektrodenfertigung kann die Trocknung bis zu 50 % des Gesamtenergiebedarfes ausmachen.

In der Assemblierung haben sich verschiedene Technologien durchgesetzt, die bereits aus früheren automobilen Anwendungen bekannt waren. So werden Module und Packs häufig vergossen oder verklebt. Eine nachträgliche Öffnung des Packs oder Austausch der einzelnen Zellen ist entsprechend nicht möglich. Somit müssen Inline-Tests nach den einzelnen Produktionsschritten wie z.B. der Assemblierung durchgeführt werden und können nicht gesammelt am Ende der Produktionslinie stattfinden.

Zusammenfassend lässt sich die Batterieproduktion als eine hochskalige Fertigung beschreiben, die bereits in der Automobilindustrie etabliert ist. Viele Prozessschritte weisen weiteres Innovationspotenzial auf. Herausfordernd dabei ist es, die Auswirkung der Prozessführung auf die Produkteigenschaften und -Qualität hat. Daraus leitet sich ein großer Bedarf für die Produktionsforschung ab, die komplette Wertschöpfung ganzheitlich zu optimieren und einzelne Prozesse zu verschlanken.

2.2 Stand der Technik – H_2 Systeme

Die Produktion von PEMFC und PEMEL ist noch nicht hochvolumenfähig. Erste automatisierte Linien zur Serienfertigung von PEMFC existieren oder werden zur Zeit in Europa, Asien und Amerika aufgebaut. Die PEMEL Produktion erfolgt allerdings noch weitestgehend in Einzel- oder Kleinserienfertigung. Wie in Kapitel 1 beschrieben, ähneln sich PEMFC und PEMEL bezüglich ihres Aufbaus, können sich jedoch in ihren Abmaßen erheblich unterscheiden. Entsprechend synergetisch kann die Produktion betrachtet werden. Abweichend zu FC existieren bezüglich ELs noch keine überschaubaren oder kategorisierbaren Zelldesigns. Eine generische Betrachtung von Produktionsketten ist daher nur bedingt möglich. Aufgrund der mangelnden Festlegung von Technologie und Prozessabfolge besteht eine große Chance für Maschinenbauer, ihr Wissen einzubringen und die Fertigung der Zukunft mit zu beeinflussen. Die PEMFC / PEMEL Serienproduktion kann während des Markthochlaus von Anfang an effizient und nachhaltig geplant und aufgebaut werden. Im Folgenden wird aufgrund der nicht skalierten und inhomogenen Designs der PEMEL hauptsächlich auf die Produktionstechnik der PEMFC eingegangen und PEMEL nur in besonderen Fällen aufgegriffen. Dabei ist sind erwartete Stückzahlen

von PEMFC deutlich größer als für PEMEL, allerdings sind die Zellen tendenziell kleiner als PEMEL.

Für die Herstellung eines PEMFC-Stacks, der aus Hunderten von einzelnen Zellen besteht, sind vier wichtige Prozessschritte zu berücksichtigen (siehe Abbildung 9). Diese Schritte sind die Herstellung der BPP, die Herstellung der MEA, die Montage der Dichtungen und das wiederholte Stapeln der verschiedenen Komponenten.

Moderne BPPs für die Massenproduktion werden aus 75-100 µm dicken Edelstahl- oder Titanblechen hergestellt [23], [24]. Die Produktionslinie für die Herstellung von BPP muss vier Prozessschritte durchführen: Formen des Strömungsfelds, Schneiden von Gaseinlässen, Fügen von zwei Halbschalen und Beschichten der Platten. Die Reihenfolge dieser Schritte kann je nach den verwendeten Technologien variieren [23].

Abbildung 6: Foto einer metallischen Bipolarplatte (Quelle: FCI Fuel Cell Industrialization GmbH)

Der Kern der MEA besteht aus der Protonenaustauschmembran (PEM) und der beidseitig aufgebrachten Katalysatorschicht (CL). Diese Unterbaugruppe wird als MEA3L bezeichnet. Die GDL liegt auf den Außenflächen der CL und definiert die MEA5L. In Kombination mit den Unterdichtungen wird die MEA7L definiert.

Abbildung 7: Foto einer MEA mit halb aufgelegter GDL (hellgrau) auf der CL (schwarz) mit Verstärkungsrahmen (weiß) (Quelle: FCI Fuel Cell Industrialization GmbH)

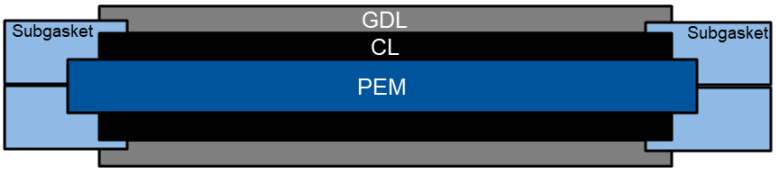


Abbildung 8: Schematischer Querschnitt einer exemplarischen MEA (Quelle: FCI Fuel Cell Industrialization GmbH)

Die PEM ist eine Protonen-leitende PFSA-Membran. Die GDL besteht in der Regel aus einem Kohlefasersubstrat mit einer mikroporösen Schicht. Sowohl die PEM als auch die GDL werden im Allgemeinen vorgefertigt und als Platten oder Spulen geliefert. Einer der wichtigsten Prozesse ist das Aufbringen der CL. Es gibt drei grundlegende Strategien für die Aufbringung des Katalysators und mehrere Technologien für den Aufbringungsprozess selbst. Unabhängig von der Technologie des Katalysatorauftrags werden verschiedene Schichten heiß zusammengepresst und bilden die MEA7L-Baugruppe. In einem letzten Schritt wird die MEA in die gewünschte Größe geschnitten. [24]–[26].

Entsprechend den genannten Technologien und Prozessen werden einige mögliche Abläufe in Abbildung 9 dargestellt und in die bereits erwähnten vier Hauptschritte BPP-Fertigung, MEA7L-Fertigung unterteilt.

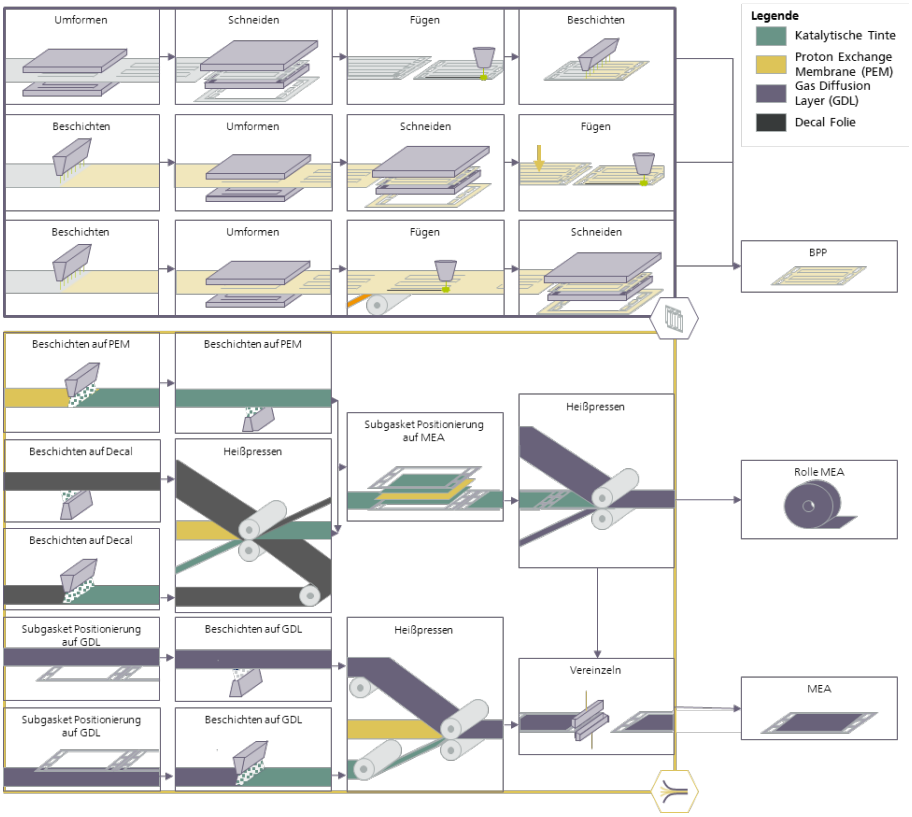


Abbildung 9: Prozesskette zur Produktion einer PEMFC [27]

Zur Herstellung einer Dichtung kann das Dichtmittel entweder auf die BPP oder auf die MEA aufgetragen werden. Die Dichtung muss normalerweise vor dem Zusammenbau der Zelle aushärten. Eine dritte Möglichkeit ist die Verwendung einer vorgefertigten Inlay-Dichtung, die beim Zusammenbau der Zelle zwischen MEA und BPP eingelegt wird. BPP und MEA werden abwechselnd aufeinander positioniert, um den Gesamtstack aufzubauen.

Kommerziell verfügbare Produktionsanlagen bzw. -linien nutzen das kontinuierliche, indirekte Beschichten auf ein Decal mit anschließendem Übertrag auf die Membran. Beschichtet wird das Decal häufig mit Schlitzdüsen. Für den Übertrag kommt ein beheizbarer Kalander zum Einsatz. Bedingt durch die Eigenschaften der Grenzflächen benötigt der Prozess des Übertrags eine gewisse Zeit, welche in einer Bahngeschwindigkeit von weniger als 1 m/min resultiert. Das Aufbringen der restlichen Lagen erfolgt in Rolle-zu-Rolle Prozessen und kann schneller als 1 m/min laufen.

Zusammenfassend lässt sich die PEMFC und PEMEL Produktion als eine hybride Fertigung mit Elementen der kontinuierlichen und diskreten Produktion und komplexen Supply Chains beschreiben. Eine beispielhafte hybride Prozesskette ist in Abbildung 10 gezeigt. Erste großtechnische Anlagen befinden sich im Aufbau, jedoch kann der aktuelle Bedarf mit Kleinserien gedeckt werden. Prozesstechnologisch wurden einige Technologien wie z.B. das Heißpressen aus Laboraufbauten übernommen. Entsprechend schlecht lassen sich aktuell genutzte Prozesse skalieren. Da zur Zeit sowohl einzelne Prozesse als auch zusammenhängende Produktionslinien aufgebaut werden, ist eine große Nachfrage an verfügbaren Technologien zur Skalierung vorhanden.

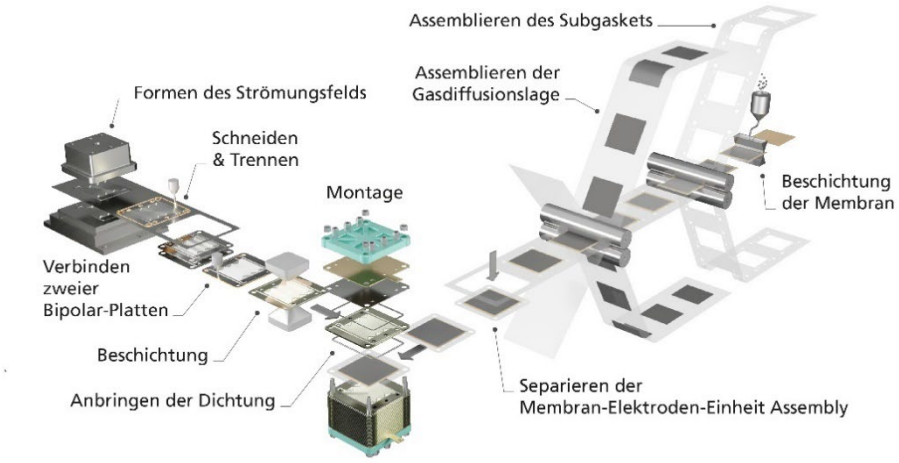


Abbildung 10: Beispielhafte hybride Produktionskette für einen PEMFC Stack mit diskreten und kontinuierlichen Prozessen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Produktion von Energiespeichern mittels hybriden Prozessketten mit diskreten und kontinuierlichen Prozessen erreicht wird. Diese haben häufig Innovationspotential durch eine Verbesserung der Technik oder disruptiven Anpassungen der Produktionsmaschinen. Diese Transformation muss datengetrieben erfolgen um eine effiziente Wandlung hinsichtlich Produktivität und Qualität zu erreichen und so ressourcenschonender und nachhaltiger produzieren zu können.

3 Verbesserungen einzelner Prozesse und Produktionslinien

Neben der Betrachtung von Prozessketten sind einzelne Prozesse im Kontext der gesamtheitlichen Fertigung wichtig. So kann die Verbesserung von spezifischen Prozessen die Zykluszeit oder den Energiebedarf der ganzen Linie senken. Auf die Verbesserung von Prozessen mit datengestützten Optimierungsverfahren wird in Kapitel 4 eingegangen. Wie in Kapitel 2 beschrieben, weisen in der Batterieproduktion die Trocknung sowie die zeitintensive Assemblierung bzw. Verschließung des Packs eine geringe Effizienz auf. In

der Produktion von H2 Systemen fehlt es an schnellen Produktionsprozessen zur CCM-Produktion mit direkter Beschichtung. Diese Prozesse werden folgend näher betrachtet und technologische Verbesserungen vorgeschlagen.

3.1 Optimierung von Konvektionstrocknung

Elektroden für Batterien werden heute in einer überwiegenden Zahl der Anwendungen im großindustriellen Maßstab in Tandem-Beschichtungsanlagen produziert (Abbildung 11). Die hohen Anschaffungskosten (CAPEX) solcher Anlagen stehen heute bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit oft im Fokus. Vielfach wird den oft erheblichen Folgekosten während des Betriebs keine ausreichende Beachtung geschenkt. Diese Betriebskosten (OPEX) übersteigen schon nach wenigen Jahren die Kosten für die reine Anschaffung. Daher muss eine umfassende Betrachtung sowie Optimierung der gesamten Kosten (TCO) erfolgen.

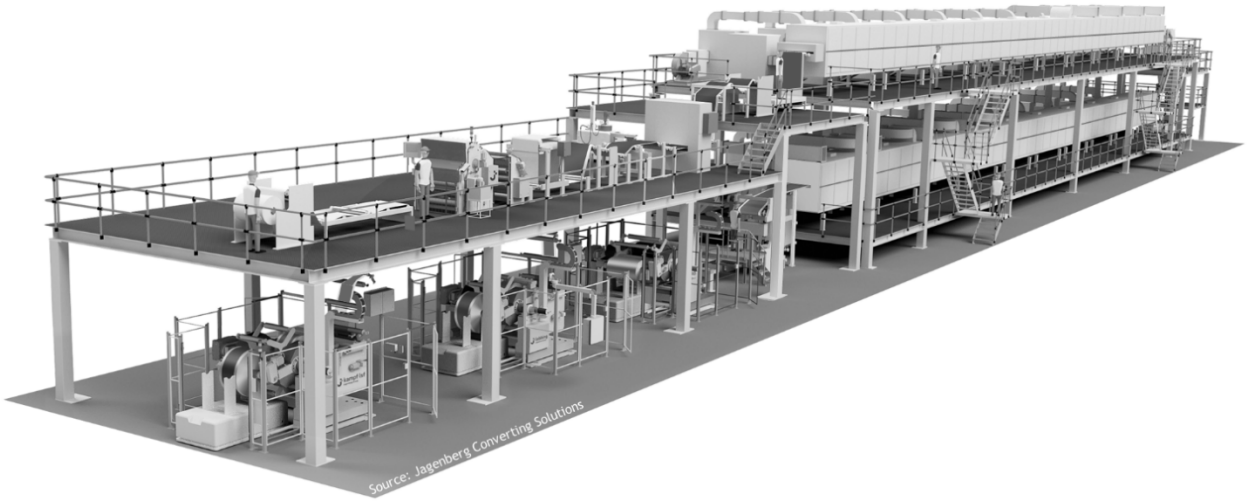


Abbildung 11: Tandem Beschichtungslinie für Batterie Elektroden (Quelle: Jagenberg Converting Solutions)

Eine heute noch gängige Methode zur Trocknung dieser beschichteten Elektroden (Anode und Kathode) stellt die Konvektionstrocknung dar. Dabei definiert die Trocknung maßgeblich die Liniengeschwindigkeit sowie den Energieverbrauch. Bis zu 50 % der benötigten Energie einer solchen Anlage wird für die Trocknung der Beschichtung aufgewendet.

Zur Trocknung der nassen Schichten kommen häufig Schwebe-Konvektionstrockner zum Einsatz. Die doppelseitig beschichteten Kollektorfolien werden beidseitig mit warmen Gasströmen beaufschlagt, was zu einer Trocknung der Schicht führen soll. Da die Wärme nur die oberen Schichten des Elektrodenmaterials erreicht und so von außen nach innen getrocknet wird, dauert der Prozess lange. Sowohl der Wärmetransport in das Material als auch der Stofftransport aus der porösen Schicht heraus führen dazu, dass konventionelle Konvektionstrockner viel Platz und Leistung benötigen und einen großen Abwärmestrom erzeugen. Die derzeit verwendeten Konvektionsöfen nutzen häufig fossile Ressourcen wie Gas oder Öl, um die erforderliche Prozesswärme zu erzeugen.

Um die Wirtschaftlichkeit und Bedienerfreundlichkeit der Beschichtungs- und Trocknungslinien zu erhöhen, kommt der Optimierung der Trockner eine entscheidende Bedeutung zu. Maßnahmen können hier bezüglich der Prozessparameter, z.B. durch die Erhöhung der Lösemittelbeladung, und durch eine optimiertes Luftmanagement ergriffen werden. Hier können bis zu 30% der CAPEX eingespart werden, z.B. bei der Installation,

der Isolierung sowie bei Rückgewinnungssystemen. Durch optimierte Prozessparameter kann zudem eine Reduzierung der Energiekosten (OPEX) des Trockners um bis zu 50% erreicht werden.

Die Luftführung und das Luftmanagement innerhalb des Trockners beeinflussen nicht nur die Qualität der Elektrode, sie definieren auch in entscheidendem Maße die Geschwindigkeit, mit der die Anlage stabil betrieben werden kann. Das sehr dünne Material (oft < 10 µm) ist äußerst empfindlich, was zu einer Faltenbildung und in der Folge zu instabilen Prozessverhältnissen in der Anlage führen kann. Durch spezielle Düsen, bei denen ein Luftstrom durch einen Venturi-Effekt Walzen antreibt, können sehr hohe Bahngeschwindigkeiten erreicht werden (Abbildung 12). Hierdurch wird zum einen die Produktivität der Anlage erhöht (OPEX) und zum anderen können Kosten für Antriebe der Walzen (CAPEX) deutlich reduziert werden.

Abbildung 12: Energie-effizienter Trockner für hohe Bandgeschwindigkeiten (Quelle: Jagenberg Converting Solutions)

Vielfach erfolgt die Wahl der vermeintlich optimalen Prozessparameter auf Basis von Erfahrung oder empirischen Ermittlungen.

Der Einsatz virtueller Prototypen im Rahmen der Entwicklung, z. B. in Form von CFD-Simulationen oder physikbasierten, interaktiven Simulationen, hilft bei der Optimierung der Komponenten und auch zur Ermittlung möglichst optimaler Prozessparameter der Fertigung im Vorfeld der Inbetriebnahme.

3.2 Neuartige strahlungsbasierte Trocknungsverfahren

Disruptive Änderungen im Trocknungsprozess stellen die Nahinfrarot- (NIR) und die Lasertrocknung dar. Bei beiden Verfahren erfolgt der Wärmeeintrag durch elektromagnetische Wellen, die eine effizientere Trocknung ermöglichen, indem sie tiefere Schichten erreichen und so ortspezifisch homogen die Schicht trocknen können. Die Trocknungszeit bzw. der Energieverbrauch können um bis zu 90 % gesenkt werden. Außerdem wird nur etwa 10 % des bisherigen Bauraums benötigt.

Infrarot-Trockner (IR) finden bereits Anwendung in verschiedenen Branchen wie der Papier- und Textilindustrie, der Kunststoffverarbeitung und der Lebensmittelherstellung. Die Trocknung durch IR-Trockner basiert auf der Erwärmung des Materials durch die Strahlung von Infrarotlicht. Die Infrarotstrahlung wird von atomaren Bindungen im Material ab-

sorbiert, wodurch diese zum Schwingen gebracht werden. Nahinfrarotlicht (NIR) mit einem Wellenlängenpeak bei 800 nm, kann dabei besonders viel Energie einbringen. Diese Schwingungen resultieren in Wärme, welche entsprechend in das umliegende Material geleitet wird. Da polare Lösemittel, insbesondere Wasser, hervorragende Absorber von Nahinfrarotstrahlung sind, wird die Trocknungsrate durch NIR-Trockner erhöht und damit die Trocknungszeit im Vergleich zu herkömmlichen Trocknungsmethoden verkürzt. NIR-Trockner sind darüber hinaus in der Lage, eine breite Palette von Materialien schnell und gleichmäßig zu trocknen, ohne die Qualität des Materials zu beeinträchtigen. Sie können daher mit leichten Anpassungen Batterien und Brennstoffzellelektroden trocknen.

Eine wesentliche Problematik der strahlungsbasierten Trocknung ist die Ausbildung einer Grenzschicht auf dem Substrat, da das verdunstete Lösemittel nicht gesammelt abtransportiert wird, sondern nur aufgrund von Konzentrationsgradienten diffundiert. Dadurch wird der Austritt weiterer Lösemittel gehemmt. Eine Möglichkeit, diese Schicht abzutransportieren, ist das Aufbringen eines definierten Gasstroms entlang der Oberfläche, wie in Abbildung 13 gezeigt.

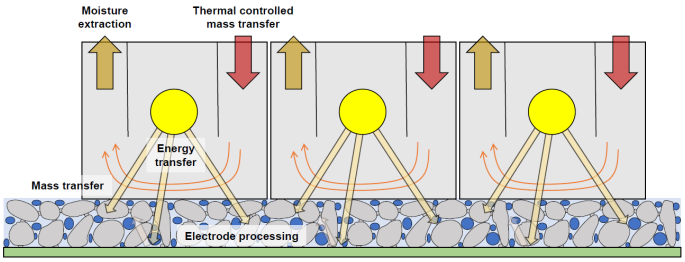


Abbildung 13: Schematische Darstellung von drei hintereinander geschalteten NIR Trockner mit Strahlen Quelle und Gasfluss (Quelle: adphos Innovative Technologies GmbH)

NIR-Trockner werden in aktuellen Produktionslinien nur in Verbindung mit Konvektionsöfen eingesetzt. Zur Verdeutlichung der Leistungsfähigkeit wurde von der Firma Adphos die Energieaufnahme von drei Trocknern verglichen. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 1. Als Referenz wurde ein Anodenslurry auf Wasserbasis auf ein Substrat aufgetragen. Die Nassschichtdicke betrug ~ 200µm, die Trockenschichtdicke 120 µm und die Schichtbreite 200mm. Getrocknet wurde im kontinuierlichen Betrieb bei 3 m/min.

Tabelle 1: Experimenteller Vergleich von verschiedenen Trocknungstechnologien (Quelle: adphos Innovative Technologies GmbH)

Anodenslurry	**Geräteausführung**	**Gesamtenergieverbrauch**
Heißluft-Konvektion thermisch erwärmte Luft + elektrische Belüftung	95 kW 8 kW	103 kWh/h 100 % (ref.)
Mittelwelle IR elektrische Leistung mit Lampenkühlung, keine Belüftung	38 kW + 2 kW	38 kWh/h 37 %
NIR-Trocknungsanlage elektrische Leistung (Energieübertragung) + elektrische Leistung (Absaugung der Lüftung)	10 kW 3 kW	13 kWh/h 13 %

Im Vergleich zur Lasertrocknung können mit NIR höhere Kosteneinsparungen erzielt werden, da Nah-Infrarot-Lampen günstiger sind als Laser. Außerdem hat NIR derzeit einen höheren Entwicklungsstand. Die Validierung als eigenständige Lösung ohne weiteres Trockenverfahren in einer großtechnischen Produktionsumgebung steht noch aus. Für den effizienten Einsatz und die Validierung von NIR Trocknern sind Daten essentiell notwendig. So können Produktdaten wie Absorption und Slurryzusammensetzung wesentliche Indikation auf thermisches und mechanisches Verhalten während der Trocknung geben und so die Produktion effizienter ermöglichen. Produktionsdaten während des Trocknens gekoppelt mit einem hochauflösenden Track and Trace Konzept ermöglichen die gezielte Nachverfolgbarkeit von Produktionsfehlern und können darüber hinaus die Trocknungsstrategie verbessern. Beide Datenursprünge befähigen schließlich Qualitätsparameter aus den Produkt- und Produktionsdaten zu schlussfolgern, um bereits während der Produktion über spätere Einsätze entscheiden zu können.

3.3 Effiziente Assemblierung von Batteriepacks

Batteriezellen in Fahrzeugen müssen in Modulen und anschließend oder direkt in Packs assembliert werden. Ein weit verbreiteter Prozess nutzt Gelenkarmroboter zur Aufbringung von Dichtmassen analog zu existenten Klebeprozessen in der Automobilbranche. Der Nachteil derartiger Klebelösungen liegt in der Zykluszeit und der Reversibilität. Bezüglich der Zykluszeit gilt es zu beachten, dass sogenannte Raupen, welche von einem robotergeführten Dispenser ausgebracht werden, erst aufschäumen müssen und anschließend mit dem zweiten Fügepartner in Verbindung gebracht werden können. Derartige Klebstoffsysteme erfüllen die Anforderung an die Versiegelung gegenüber Umwelteinflüssen wie Fremdflüssigkeiten oder Partikel. Nach dem Aufbringen des Deckels lässt sich daher das Pack nicht erneut öffnen, was hinderlich für ein End-of-Line-Testing aber auch für Recyclingprozesse sein kann. Etwaig erhobene Daten in der Produktion aber auch im Lebenszyklus können so nicht maximal effizient genutzt werden.

Ein Ansatz sowohl schnellere Taktzeiten als auch Wiederöffnung zu ermöglichen, kann die Aufbringung von Klebe-Tapes mit exakten Produktionsmaschinen sein. Die Etablierung einer solchen Materiallösung erfordert die Kooperation aller involvierten Stakeholder. Die Zusammenarbeit von Produkt- und Materialentwicklung sowie Prozess- und Produktionsautomatisierung kann Synergieeffekte freisetzen. So hat die Firma tesa SE einen neuen, flexiblen Klebstoffauftrag entwickelt, der neben der zuverlässigen, sauberen und automatisierten Versiegelung von Akkupacks auch eine Nachbesserung des Akkupacks problemlos ermöglicht [28]. Das Material auf Acrylschaum-Basis benötigt keine Aushärtezeiten und lässt sich einfach und automatisiert verarbeiten. Dazu entwickelte die Vulkan Technic GmbH das passende Ausbringungskonzept. Die Liebherr-Verzahntechnik GmbH lieferte als Generalunternehmer den Proof-of-Concept für die Umsetzung des gesamten Produktionsprozesses. Ein automatisiertes Wechselkonzept des Applikators reduziert die CAPEX für die Basismaschinen sowie Rüstzeiten bei Materialwechsel (OPEX). So kann ein Flüssigklebstoff-Dispenser auf derselben Basisanlage betrieben werden, wie der Klebeband-Applikator. Außerdem ergeben sich neue Optionen der Produktflussgestaltung. Zum einen entfallen Reaktionszeiten des geschäumten Flüssigklebstoffs. Zum anderen sind Nacharbeiten außerhalb der Produktionslinie sowie die räumliche und zeitliche Entkopplung des Ausbringungsprozesses und seiner Folgeprozesse umsetzbar. Neben wirtschaftlichen Vorteilen kann somit auch nachhaltiger produziert werden [28]. Daten nehmen eine entscheidende Rolle in der neuartigen Verschlusstechnik ein. Durch

eine Doppellegung des Tapes am Start- bzw. Endpunkt, wird ein ausreichender Verschluss gewährleistet. Die Länge der Überschneidung und der Abstand der beiden Tapes kann dabei mittels Analyse von Produkt- und Produktionsdaten optimiert werden.

3.4 Direktbeschichtung von CCMs für PEMFCs und PEMELs

Eines der ersten Prozesse in der PEMFC/-EL Produktion stellt die Aufbringung der Elektroden bzw. katalytischen Schichten (CL) auf die Membran dar. In der Kleinserienproduktion wird diese wenige µm dicke Schicht erst auf ein Decal beschichtet und getrocknet und anschließend in einer Heißpresse auf die Membran übertragen. Der Prozess entspricht den Laborprozessen, mit welchen CCMs entwickelt werden. Der Vorteil dieses Prozesses ist die einfachere Handhabung der Membran, da sie sich durch Kontakt mit Lösemitteln verziehen kann (bis zu 30 %), was durch die vorherige Trocknung der CL ausgeschlossen werden kann. Der Nachteil ist die lange Dauer des Prozesses. In Entwicklungslaboren kann der stationäre Prozess zwischen 60 und 300 Sekunden dauern. Dieser Prozess wird in aktuellen Produktionslinien mit einem beheizten Kalander bzw. Walzenteppichen und mit Vorwärmzonen nachempfunden. Aufgrund der Linien-Kontaktfläche des Kalanders ist eine flächige Verpressung nicht möglich. Die Bahngeschwindigkeit muss daher im niedrigen einstelligen m/min Bereich liegen und stellt ein Hindernis einer möglichen weiteren Skalierung dar. Die direkte Beschichtung ist unabhängig von dem Heißpressvorgang und kann so auf alle verfügbaren Skalierungsmöglichkeiten zurückgreifen. Einen maschinenseitigen Ansatz zur Unterdrückung der Verkrümmung der Membran beim Beschichten wird im Folgenden dargestellt.

Der Grund für das Verziehen der Membran bei Kontakt mit organischen Lösemitteln ist das Material, aus welchem die Membran hergestellt ist. Sie besteht aus einem Ionomer, typischerweise einem sulfonierten Fluorpolymer-Copolymer auf Tetrafluorethylen-Basis, und ist damit undurchdringlich für Elektronen. Die Wasserstoff-Ionen diffundieren durch die PEM und reagieren mit Sauerstoff zu Wasser. Die ionische Leitfähigkeit wird gewährleistet durch ein Polymernetzwerk, welches mit Wasser und organischen Lösemitteln gefüllt ist. Beim Austausch der Lösemittel verändert sich das Polymernetzwerk und damit auch die Makrostruktur der Membran. Der CL besteht in der Regel aus Kohlenstoffpartikeln mit Platin und einer bestimmten Menge desselben Ionomers, welches auch in der PEM verwendet wird. Auf diese Weise bilden Ionomer, Kohlenstoffpartikel und Platin eine Grenzfläche, an der die Ionisierung stattfindet. Für einen Nassauftrag werden die Feststoffe üblicherweise in Alkoholen dispergiert.

Da die MEA eine kritische Komponente ist, die die Lebensdauer eines PEMFC-Stacks begrenzt, sind qualitativ hochwertige Komponenten zwingend erforderlich. Darüber hinaus hat die MEA einen erheblichen Einfluss auf den Wirkungsgrad und die Stabilität einer FC [29], [30]. Eine relevante Teilkomponente für Wirkungsgrad und Kosten ist der eingesetzte Katalysator. Die Höhe der Katalysatorbeladung wirkt sich direkt auf das Ziel aus, die Grenzfläche (aktive Oberfläche) zwischen Katalysator, Ionomer und elektrisch leitendem Katalysatorträger zu vergrößern (vgl. Abbildung 14). Eine größere Menge an aktivem Katalysator kann die Leistungsdichte und Haltbarkeit optimieren, führt aber auch zu einem Anstieg der Materialkosten. Die Maximierung des verfügbaren Katalysators ist da-

her von großem Interesse und kann durch verschiedene Arten von Produktionstechnologien beeinflusst werden. In den meisten Anwendungen von PEMFCs wird Platin als Katalysatormaterial verwendet.

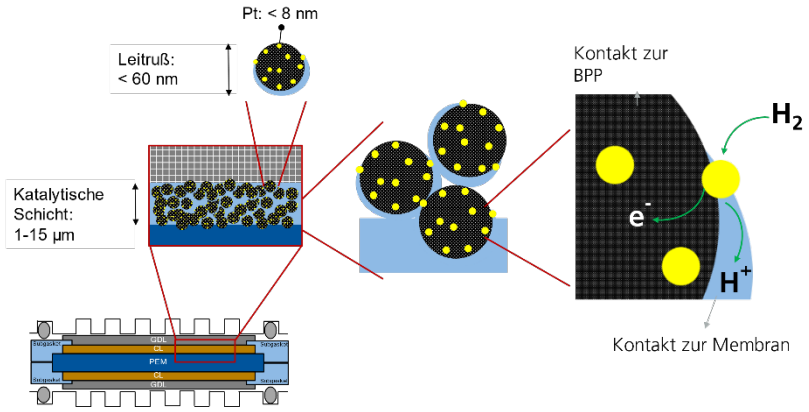


Abbildung 14: Aufbau der Schichten einer MEA und Transport von Reaktanten (Quelle: Fraunhofer IPT)

Im Folgenden wird ein Maschinenkonzept für die direkte Beschichtung mit Inkjet vorgestellt, welches das beschriebene Problem adressiert.

Unabhängig vom Beschichtungssubstrat (Decal/Membran) muss festgelegt werden, ob das Substrat durchgängig (kontinuierlich) oder mit unbeschichteten Flächen (intermittierend) aufgebaut werden soll. Schematisch sind beide Verfahren in Abbildung 15 dargestellt. Die kontinuierliche Beschichtung ermöglicht einen stationären Prozess mit konventionellen Technologien wie z.B. der Schlitzdüse. Bei der diskontinuierlichen Beschichtung kann ein Prozess mit agilen Beschichtungstechnologien ohne Anfahr- und Stoppverzögerung wie z. B. dem Inkjet Verfahren stattfinden. Abhängig vom Design der MEA (vgl. Abbildung 8) ergibt sich aus einer kontinuierlichen Beschichtung die Notwendigkeit der Vereinzelung und diskreten Handhabung auf das Subgasket. Ein Teil des Katalysators wird vom Subgasket verdeckt und trägt somit nicht zur elektrochemischen Reaktion bei. Intermittierend beschichtete Membranen bieten Vorteile hinsichtlich der Ausnutzung des Katalysators.

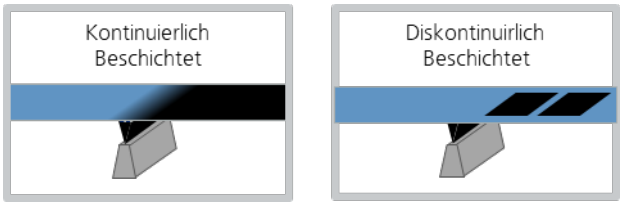


Abbildung 15: Veranschaulichung kontinuierlicher und intermittierend Beschichtung

Zusätzlich bietet die Beschichtung mittels Inkjet eine höhere Flexibilität für die Beschichtungsgeometrie, da Schlitzdüsen ausschließlich in rechten Winkeln beschichten können.

Eine intermittierende Beschichtung auf Decals benötigt eine komplexe Schichterkennung auf dem Decal und anschließende Synchronisation von drei Bahnen, um die CLs flächendeckend aufeinander zu positionieren. Bei der direkten Membranbeschichtung hingegen muss nur die Membran in die korrekte Position gebracht werden und zur korrekten Zeit beschichtet werden. Durch die produktspezifische Steuerung der Beschichtung wird auch der Katalysatornutzen gesteigert und mögliche Skalierungsengstellen vermieden.

Die direkte Beschichtung benötigt jedoch eine starke flächige Fixierung der Membran, um etwaige Aufwerfungen zu vermeiden. Bewährte Werkstückträger sind Vakuumtische mit Vakuumlöchern kleiner als 0,5 mm im Durchmesser. Vakuumtische, üblicherweise benutzt für diskontinuierliche Prozesse, können im Wesentlichen auf zwei Arten in ein hochskalierbares Maschinenkonzept überführt werden. Einerseits kann eine Vakuumwalze genutzt werden oder ein Vakuumband wird verbaut. Folgend werden Vor- und Nachteile der beiden Ansätze diskutiert.

Eine **Vakuumwalze** ist eine mit Luftkanälen versehene Walze mit auf der Lauffläche eingebrachte Löchern, um Vakuum zu ziehen. Löcher mit Durchmessern kleiner 0,5 mm können nur schwer auf konventionellen Wegen in einen rotationssymmetrischen Körper eingebracht werden. Daher gibt es Ansätze, Vakuumwalzen mittels metallischem 3D-Druck zu fertigen.

Der Beschichtungsvorgang durch Inkjet findet üblicherweise mit Feststoffanteilen von wenigen Prozent statt. Die Viskosität und die Fließgrenze sind daher üblicherweise gering. Der Auftrag auf eine Walze sollte möglichst auf einer Ebene parallel zum Boden erfolgen, um Verfliesungen zu vermeiden. Da im Bereich PEMFC und PEMEL jedoch Schichten bis zu 20 µm aufgetragen werden müssen, besteht der Inkjet Prozess je nach Bahnbreite und Geschwindigkeit aus mehreren Druckköpfen bzw. mehreren Düsen hintereinander. Um einen gleichen Abstand zur Walze zu gewährleisten, müsste der Druckkopf daher gekrümmt sein. Die Trocknung sollte unmittelbar nach dem Beschichten erfolgen, so können Verzugseffekte der Membran minimiert werden. Entsprechend der Bahnrichtung würde der Trockner schräg bzgl. des Bodens angeordnet sein, was kein Problem darstellt. Problematischer ist der ungleiche Abstand des Substrats zum Trockner aufgrund der Krümmung der Vakuumwalze. Eine Möglichkeit diesen Effekt auszugleichen, ist die Trocknung nach Ablösung von der Walze. In Vorversuchen konnte jedoch beobachtet werden, dass eine Trocknung ohne Fixierung der Membran zu deutlichen Verzügen der Membran führt. Eine Trocknung auf der Walze ist daher unablässig. Eine letzte Problematik ergibt sich für die seriennahe prototypische Fertigung. Das Auflegen von Membranen auf die Walze im Sheet Prozess bringt eine gewisse Komplexität mit sich. Zusätzlich ist die Zeit, in welcher die Fläche zu detektieren ist, die bedruckt werden soll, abhängig von der Geschwindigkeit aber viel mehr noch vom Walzendurchmesser. Würde die Erkennung vorab erfolgen, könnte sich durch die anschließende Ansaugung eine Abweichung ergeben. Ein Vorteil der Walze ist, dass ihre Ränder konstant laufen.

Im Gegensatz dazu kann das verschweißte **Vakuumband** deutlich driften und eine exakte Bandführung ist nur nach intensiver Charakterisierung möglich. Ist der Banddrift kontrollierbar, ergeben sich einige Vorteile in der Nutzung eines Vakuumbandes. Die Fertigung von Stahlblechen mit Löchern im Durchmesser von 0,5 mm kann durch Ätzen realisiert werden. Die Orientierung des Bandes ist stets horizontal, weshalb bei Beschichtung mit dünnflüssigen Tinten nur die Bahngeschwindigkeit betrachtet werden muss, nicht aber die Schwerkraft. Die Beschichtung und die Trocknung hat stets denselben Abstand zu den zu trocknenden Proben und die Zeit zur Erkennung der Schichten hängt von Bahngeschwindigkeit und Bandlänge ab. Ein weiterer Nachteil des Vakuumbandes ist, dass starkes Vakuum starke Motoren benötigt, um die Reibung des Bandes auf den darunterliegenden Vakuumplatten zu überwinden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass insbesondere bei Hochvakuumanwendungen Walzen deutlich einfacher zu handhaben sind, ggf. aber eine schnelle Sensorik brauchen, um Schichten zu erkennen. Vakuumbänder hingegen sind zu favorisieren, wenn flexible Stückzahlen und geringere Vakuummengen benötigt werden.

Neben der Geschwindigkeit der Sensorik zur Erkennung der Beschichtungen ist die **Beschichtungstechnologie** ein entscheidendes Merkmal, welches die effiziente Beschichtung beeinflusst. Stand der Technik für Beschichtungen von Membranen für PEMFC und PEMEL sind in skalierten Produktionen Schlitzdüsen. Diese Technologie wird ebenfalls in der Batterieproduktion eingesetzt und ist gut erforscht. Der Vorteil der Schlitzdüse ist der recht einfache Aufbau und damit geringe CAPEX. Der Nachteil ist das Verhalten beim Anfahren und beim Auslaufen des Prozesses oder wenn nicht flächig beschichtet werden soll. So brauchen Schlitzdüsen eine gewisse Zeit nach Anlaufen, bis die Beschichtung reproduzierbar ist. Intermittierende Beschichtungen können durch Start/Stopp der Zuführung erreicht werden, allerdings zu Ungunsten der Kanten der Beschichtung. Der Grund für das träge Verhalten ist die Physik hinter der Schlitzdüse. Es bildet sich ein Meniskus vor der Düse aus, welcher eine gleichmäßige Beschichtung ermöglicht. Stoppt der Nachfluss der Tinte, baut sich der Meniskus ab und die Beschichtung ändert sich. Zu Beginn muss der Meniskus entsprechend neu aufgebaut werden. Es gibt seit wenigen Jahren Schlitzdüsen, welche mit Piezoaktoren ausgestattet sind, um dieses Problem zu adressieren. So kann der Abstand der Lippen der Düse gesteuert werden und so der Meniskus spezifisch gesteuert werden.

Neben der komplexen Ansteuerung von Schlitzdüsen für intermittierende Beschichtungen muss für eine effiziente Beschichtung auch die Ausrichtung in axialer und transversaler Richtung in Betracht gezogen werden. Die Schlitzdüse müsste entsprechend zwei Aktoren haben, durch welche Sie sich orthogonal zur Bahnrichtung und um ihren Mittelpunkt drehen könnte. Eine Alternative mit weniger Antrieben ist die InkJet Technologie. Durch ihre hohe Anzahl an individuellen Druckdüsen kann analog zu Tintenstrahl-Tischdruckern eine Form erzeugt werden, welche auf das vorher bestimmte Feld abgestimmt ist. So ist eine flächendeckende Beschichtung durch digitale Regelung denkbar. Entsprechend einfach ist die Umstellung auf andere Abmessungen oder gar Geometrien. Diese Fähigkeit ermöglicht es, flexibel neue Produktdesigns zu produzieren. Ein Nachteil der InkJet Beschichtung ist der relativ geringe Feststoffanteil der Tinten von wenigen Prozent und die damit einhergehend nötige Verdunstung des Lösemittels. NIR-Trocknungstechniken könnten diese Herausforderung adressieren.

4 Entwicklung von Produktionslinien der nächsten Generation

In der Produktion von Energiespeichern gewinnt das Neudenken von bestehenden Produktionslinien an Bedeutung. Viele Hersteller von Energiespeichern stehen vor der Herausforderung, ihre Produktion auf die steigende Nachfrage und neue Produkttypen auszurichten. Eine Möglichkeit besteht darin, die Produktionslinien so zu optimieren, dass sie flexibel genug sind, um schnell auf Änderungen in der Nachfrage zu reagieren. Zudem können die Implementierung von Automatisierung und Digitalisierung sowie die Verwendung von umweltfreundlichen Materialien dazu beitragen, die Produktionskosten zu senken und die Nachhaltigkeit der Produktion zu verbessern. Neben der Verbesserun einzelner Technologien können auch neue Produktionsmethoden erforscht und eingeführt werden, um die Effizienz und Qualität der Energiespeicherproduktion zu steigern. Das Neudenken von bestehenden Produktionslinien erfordert jedoch oft Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie in neue Technologien und Anlagen, um langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben.

4.1 Neuartige Batterieproduktion

Bei der Batterieherstellung steigt die Bedeutung der Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit. Es gibt erhebliche Unterschiede in diesen Kriterien innerhalb der verschiedenen Technologien der modernen Batteriezellenproduktion. Für eine exemplarische Batteriefabrik in Deutschland mit einem Produktionskapazität von 7 GWh/a wird in Abbildung 16 die Verteilung des Energieverbrauchs und der entsprechenden THG-Emissionen sowie der Herstellungskosten über die einzelnen Prozessschritte der Zellproduktion analysiert. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Analyse keine weiteren Energieverbraucher wie Trockenräume oder Batteriehandling berücksichtigt und dass Erdgas und Strom in gewissem Umfang substituiert werden können. Der resultierende CO2-Fußabdruck hängt also vom zugrunde liegenden Strommix und der Erdgaszusammensetzung ab. [21], [22], [31].

Bei der Betrachtung der Kriterien Kosten und Energieverbrauch stechen drei Fertigungsschritte innerhalb der Elektrodenherstellung und -montage hervor: Beschichtung, Trocknung (inkl. Vakuumtrocknung) sowie Stapelung.

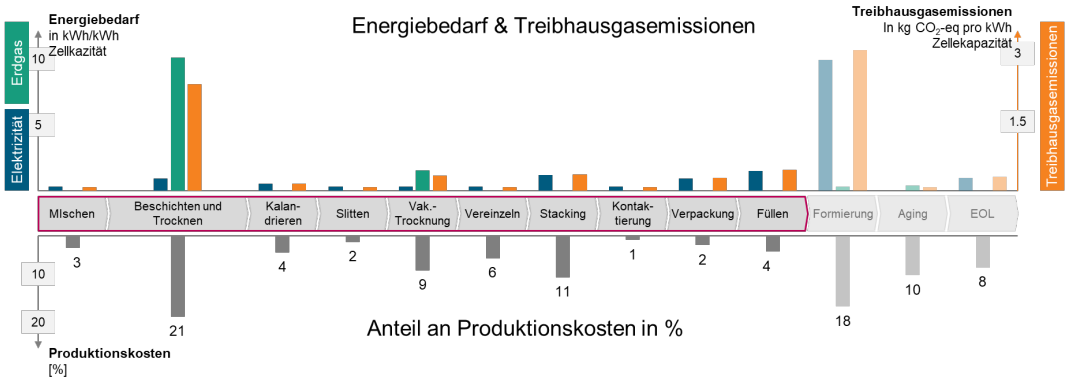


Abbildung 16: Analyse der Prozessschritte im Hinblick auf Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und Herstellungskosten übernommen aus [22]

Die enge Verbindung zwischen Beschichtung und Trocknung ist ein großer Kostentreiber in der Herstellung von Batterien und wird oft in eine gemeinsame Anlage integriert. Etwa 21% der Herstellungskosten werden diesem Prozessschritt zugeordnet, da er einen hohen Energieverbrauch aufweist (~10 kWh/kWh Zellkapazität bei Verwendung von Erdgas, was mehr als 80% des gesamten Gasverbrauchs ausmacht). Zusätzlich wird viel Platz für die langen Trockenöfen benötigt. Besonders die Lösungsmittelentfernung erfordert viel Energie und muss angesichts steigender Erdgaspreise gesenkt werden. Darüber hinaus trägt die Vakuumtrocknung mit 9% zu den Herstellungskosten bei, da sie zusätzliche Prozesswärme zur Entfernung der Restfeuchte benötigt. Der Stapelprozess ist innerhalb der Zellmontage der größte Kostentreiber, da er eine langsame Prozessgeschwindigkeit (1 Elektrode/s) sowie einen hohen Platzbedarf aufweist [6]. Derzeit gibt es den Nachteil einer mangelnden Flexibilität beim Stapeln. Bestehende Stapelmaschinen sind nur für bestimmte Zellenformate und -größen geeignet und erschweren eine Anpassung der Produktion. Aus diesem Grund besteht ein Bedarf an einem kontinuierlichen und flexiblen Stapelprozess, der die sich ändernden Zellkonzepte und -größen berücksichtigt [32].

Innovationen lassen sich in radikale und inkrementelle Innovationen unterscheiden. Eine radikale Innovation könnte darin bestehen, Lösungsmittel im Materialmix zu vermeiden und stattdessen auf Trockenbeschichtung umzustellen. Inkrementelle Innovationen dagegen könnten darauf abzielen, den bestehenden Nassbeschichtungsprozess zu optimieren, indem beispielsweise die etablierte Konvektionstrocknung durch Laser- oder

Nahinfrarot-Trocknung verbessert wird. Bezüglich der Elektrodenherstellung und Zellmontage ist der Stapelprozess der zweitgrößte Kostentreiber. Derzeit wird das Stapeln durch diskontinuierliche Pick-and-Place-Verfahren durchgeführt, die noch optimiert werden könnten.

Abbildung 17 veranschaulicht die Auswirkungen der vorgestellten Innovationen auf vor- und nachgelagerte Prozessschritte und zeigt entsprechende Technologieketten auf. Es ist erkennbar, dass die größten Auswirkungen in der Technologiekette der Trockenbeschichtung liegen, welche sich auf die meisten nachfolgenden Prozesse auswirkt. Im Gegensatz dazu ist die optimierte Trocknungstechnologiekette nur auf den Trocknungsprozess selbst bezogen und kann größtenteils mit der vorhandenen Anlagentechnik durchgeführt werden. Die Technologieketten zur Elektrodenherstellung haben das Potenzial, mit der Innovation der kontinuierlichen Stapelung verknüpft zu werden.

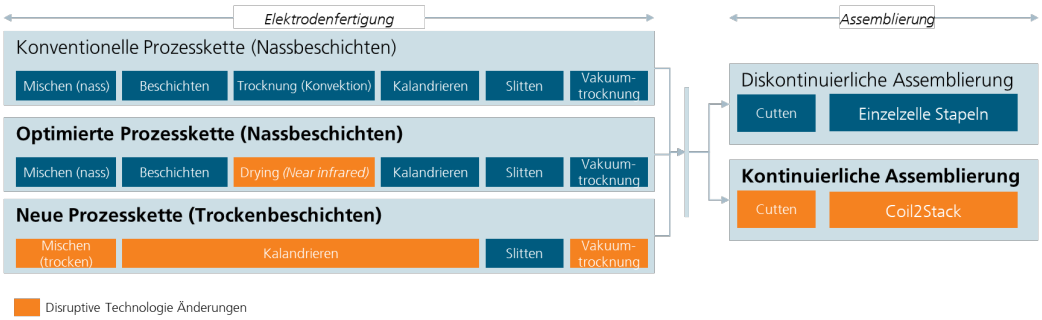


Abbildung 17: Ableitung zukünftiger Technologiekettenalternativen auf Basis der untersuchten Technologieinnovationen übernommen aus [22].

In den nächsten 1-3 Jahren wird es notwendig sein, weitere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen für jede der in Abbildung 17 dargestellten Technologieketten vorzunehmen. Langfristig (> 5 Jahre) wird die Trockenbeschichtung unbestreitbare Vorteile bieten, da sie die Kosten und den Energieverbrauch erheblich senkt. Die mittelfristige (3-5 Jahre) Verwendung einer bestimmten Technologiekette hängt jedoch vom Fortschritt der Trockenbeschichtungstechnologien ab. Da die Industrialisierung der Trockenbeschichtung langfristig realistisch ist, könnten Laser- und Nahinfrarot-Trocknungstechnologien schon früher an Bedeutung gewinnen, da sie sich leichter in bestehende Anlagen integrieren lassen. Batterieausrüster sollten die weitere Entwicklung der Trockenbeschichtungstechnologie sorgfältig beobachten, unabhängig davon, ob sie Anbieter dieser Technologie sind oder nicht, da sie die Produktion von Batteriezellen grundlegend verändern wird. Ein Hersteller von Konvektionsöfen könnte beispielsweise mit einem potenziellen Rückgang des adressierbaren Marktvolumens konfrontiert sein, obwohl die Nachfrage nach Batterieausrüstungen im Allgemeinen steigt. Ausrüstungsanbieter sollten daher die Auswirkungen potenzieller Innovationen entlang der Prozesskette auf ihre etablierte Technologie ermitteln und auch neue Innovationen in vor- und nachgelagerten Prozessen erkunden und überwachen [22]. Neuartige Batteriekonzepte verlangen neuartige Produktionskonzepte, da eine Änderung der Zellchemie oder des Zelldesigns auch immer eine Änderung an der Produktionstechnologie bedeutet. Durch Produkt- und Produktionsdaten können derweil Änderungen effizienter und erfahrungsbasiert umgesetzt werden.

4.2 Zukünftige Produktion von H_2-Systemen

Mit der Entstehung der ersten Großserien-Fertigungen ist es wichtig, bereits die Produktion von morgen und übermorgen zu betrachten. Aktuell Produktionen nutzen skalierte

Prozesse aus Laboranwendungen und bedienen sich an Technologien der Batterieproduktion. Die beschriebene direkte Beschichtung ist eine Möglichkeit die Effizienz zu steigern und mehr Flexibilität zu ermöglichen. Die Festlegung auf eine Beschichtungstechnologie hat Auswirkungen auf das fertigbare Design und nachfolgende Prozesse.

Eine mögliche Produktionskette basierend auf der direkten InkJet Beschichtung wird folgend beschrieben. Der Fokus in der Maschinenauswahl soll auf Flexibilität, synergetischer Fertigung und Ressourceneffizienz liegen. Aufgrund der bereits beschrieben Flexibilität des Inkjettings kann sowohl kontinuierlich als auch intermittierend beschichtet werden.

Nach dem doppelseitigen Beschichten muss das CCM-Coil vereinzelt werden, idealer Weise parallel zu den applizierten CLs. Aufgrund der Flexibilität bzw. des Designs der CCMs und bauteilspezifischen Abweichungen ist Laserschneiden eine geeignete Möglichkeit. Diese Technologie erlaubt es, jedes Bauteil spezifisch zu vereinzeln. Nach dem Beschichten wird die CCM doppelseitig in Subgaskets eingeklebt. Diese sind selbstklebende thermoplastische Folien, aus welchen bereits eine Öffnung für die CL ausgeschnitten wurde. Die Rolle zu Rolle Positionierung kann entweder mit dem CCM-Coil oder mit vereinzelten CCMs geschehen. Ressourceneffizienter ist das Pick and Place einer CCM auf das abgewickelte Subgasket. Anschließend wird in einem zweiten Pick and Place Schritt das zweite Subgasket aufgelegt und die MEA wieder aufgerollt. Im letzten Schritt kann dieses MEA-Coil erneut abgewickelt werden und in einem Pick and Place Schritt die vereinzelte GDL aufgelegt werden. Dieser Schritt muss zweimal erfolgen.

Mit dem beschriebenen Prozessablauf können MEAs mit Hilfe von zwei Anlagen gefertigt werden. Die erste Anlage beschichtet und trocknet die Membran (CCM-Produktion). Die zweite Maschine besteht aus einem Vakuumband mit zwei Gantrys, welche die diversen Produkte auf der Bahn positionieren. So können mit entsprechender Sensorik die beschriebenen Prozesse „CCM auf Subgasket“ und „MEA auf GDL“ innerhalb einer Maschine abgebildet werden. Durch die geringe Anzahl an Anlagen ist eine Matrixproduktion von verschiedenen Produkten wie PEMEL und PEMFC denkbar.

Auch in der Fertigung der metallischen Bipolarplatten als zweite zentrale Komponente in Wasserstoffsystemen sind Innovationen zur Kostenreduktion und zum Upscaling der Produktion notwendig. Als Grundwerkstoff der metallischen Bipolarplatten kommen mehrere Materialien in Frage. Im Stand der Technik werden insbesondere Edelstähle und Titanmaterialien verwendet. Beide Materialien sind grundlegend umformbar, wobei Titan in diesem Punkt eine größere Herausforderung darstellt, jedoch einen höheren Korrosionswiderstand aufweist. Dieser Faktor ist entscheidend in Bezug auf die Lebensdauer der BPP. Edelstahl oder perspektivisch Aluminium können in mobilen Anwendungen aufgrund der geringeren Dichte vorteilhaft sein und sind darüber hinaus kostengünstiger als Titanmaterialien. Es gibt grundsätzlich zwei zukunftsweisende Verfahrensvarianten zur hochratenfähigen Umformung von Bipolarplatten. Zum einen diskrete und zum anderen kontinuierliche Verfahren. Als Vertreter der diskreten Verfahren sind hier die Folgeverbundtechnik oder der Einsatz eines Transferwerkzeugs zu nennen. Die Rolle-Zu-Rolle Umformung ist in dieser Unterscheidung als kontinuierliche Umformung zu bezeichnen, da sich das Grundmaterial stetig bewegt. Die Wahl des geeigneten Verfahrens hängt stark von der zu produzierenden Stückzahl, dem Design der BPP, dem Ausgangsmaterial und Anwendungsbereich bzw. der Größe ab.

Insgesamt ist die Wahl des Verfahrens zur Herstellung von BPP stark von den Eigenschaften der jeweiligen Komponente abgängig. Sowohl die diskreten als auch die konti-

nuierlichen Fertigungsverfahren haben Vor- und Nachteile, und die Entscheidung, welches Verfahren verwendet werden soll, sollte sorgfältig abgewogen werden, um die optimale Produktionsmethode für das spezifische BPP-Design zu finden. Darüber hinaus ist die wirksame Kombination mehrerer umformtechnischer Wirkprinzipien bisher unzureichend untersucht. Die Hybridisierung der Umformung kann ein weiterer, vielversprechender Ansatz sein, um die Produktionstechnik für die Zukunft der BPP-Umformung zu entwickeln.

Mit steigenden Stückzahlen sowohl von BPPs als auch von MEAs steigt der finanzielle Fußabdruck des Ausschusses und der Auslastung der Anlage, beides Aspekte der sogenannten Overall Equipment Effectiveness (OEE). Die OEE gilt es möglichst hochzuhalten und Daten sind ein entscheidender Enabler dafür. So können die im Aufbau befindlichen Produktionslinien bereits zu Beginn der hochraten Fertigung von PEMFC und PEMEL entsprechende datengetriebene Synergien nutzen und Entwicklungsfehler der LIB-Produktionsanlagen vermeiden. Daten bezüglich PEMEL und PEMFC haben das Potential teure Rohstoffe wie Iridium und Platin zu reduzieren, die Menge an flourbasierten Polymeren (PFAS) zu senken und predictive maintenance der Stacks zu ermöglichen.

4.3 Die Datenwertschöpfungskette in der Energiespeicherproduktion

Die wachsenden Anforderungen an die Skalierbarkeit und Nachhaltigkeit in der Energiespeicherproduktion macht auch den Einsatz von datengestützten Optimierungsverfahren notwendig. Dies erfordert die Implementierung von zuverlässigen Datenwertschöpfungsketten. Dazu gehören die Datenpipeline, Vor- und Aufbereitungsprozesse, eine zielgerichtete Analyse der Daten, ein Datenhaltungskonzept und die letztendliche Anwendung.

Die Datenpipeline beschreibt dabei den gesamten Weg der akquirierten Daten von der Quelle, beispielsweise einem Sensor, über Vorverarbeitungsschritte bis zur Datensenke. Aufbauend auf einer dadurch geschaffenen Datenbasis können verschiedene Assistenz- und Optimierungssysteme entwickelt werden. Digitale Zwillinge bieten eine Vielzahl von Optimierungsmöglichkeiten in der Produktion. Ein Produktzwilling kann die Produktentwicklung durch Simulationen unterstützen, erleichtert die Überwachung der Produktqualität und ermöglicht Traceability-Methoden. Auch das in Hinblick auf die Nachhaltigkeit wichtige Product Lifecycle Management (PLM) kann mit einem Produktzwilling implementiert werden. Ein Anlagenzwilling hingegen unterstützt bei der Optimierung des Produktionsprozesses an sich. Mit Hilfe von Predictive Maintanance kann der Verschleiß an Anlagekomponenten vorhergesagt werden. Dadurch wird ein frühzeitiges Eingreifen ermöglicht und so die Ausfallszeit verkürzt, sowie mögliche Schäden an weiteren Komponenten vermieden.

Des Weiteren kann das aus Historiendaten bestehender Anlagen gewonnene Wissen zur Optimierung neuartiger Prozesse und Identifikation von Synergien angewendet werden. Eine Herausforderung bei der Implementierung von Datenpipelines ist die Heterogenität der Anlagenlandschaft und der zu erhebenden Daten. Moderne IIoT-Plattformen ermöglichen jedoch die Integration verschiedener Datenquellen über gängige Kommunikationsprotokolle. Zur Bereinigung und Synchronisation der heterogenen Daten vor der persistenten Speicherung bietet sich der Einsatz von Edge-Computer an.

5 Zusammenfassung und Fazit

Die Produktion von Energiespeichern ist ein dynamischer Markt, welcher wesentlich getrieben wird durch die Produkte Batterie und Brennstoffzelle. Daraus ergeben sich erhebliche Anforderungen an die Skalierbarkeit und Flexibilität der eingesetzten Produktionstechnologie. Die Batterieproduktion muss sich neuen Trends anpassen, was aufgrund bestehender Prozesse schwierig ist. Es gibt Veränderungen in der gesamten Produktionskette durch neue Produktgenerationen und Veränderungen innerhalb der vorherrschenden Batteriesysteme. Marktchancen für Maschinenlieferanten entstehen, da bis 2030 ein Wachstum der Batterieproduktion in Europa von mehr als 1300 GWh prognostiziert wird. Die Produktion von LIB-Zellen besteht aus der Elektrodenherstellung, Zellmontage und dem Zellfinishing. Vergleichsweise viel Energie wird für das Trocknen in der Elektrodenherstellung benötigt. Innovationen sind möglich in der Verbesserung der vorhandenen Technologie wie z.B. der Konvektionstrocknung oder disruptive Entwicklungen wie das NIR-Trocknen. Beide Technologien erhöhen die Trocknungsrate und verringern so Trocknerlänge und Energiebedarf. Nach der Zellproduktion können die Zellen in Module verpackt werden, welche anschließend in so genannte Packs assembliert werden. Diese werden aktuell irreversibel verklebt, was Testing und Recycling erschwert. Hier gibt es innovative Lösungen mit Tapes und deren Applikation, welche dichte und wieder öffenbare Packs ermöglichen.

In der Fertigung von LIBs gibt es nur wenig Synergien zur Fertigung anderer Zellformate oder Zellchemie, was zu großem Verbesserungsbedarf in vielen Prozessschritten führt. Es besteht jedoch eine große Unsicherheit bezüglich des Einflusses von Prozessänderungen auf Zuverlässigkeit und Qualität. Mögliche Implikationen der Verbesserungen auf die folgenden Produktionsprozesse können weitreichend sein. Um diese Innovationshemmung zu beseitigen, ist Forschung erforderlich, um die komplette Wertschöpfung neu zu denken und Prozesse zu verschlanken. Datengetriebene Produktionsoptimierung kann ein Werkzeug dafür sein.

Die Produktion von PEMFC und PEMEL ist noch nicht hochvolumenfähig. Erste PEMFC Linien werden weltweit aufgebaut, während PEMEL noch weitgehend manuell produziert werden. Die Produktionstechnik von PEMFC und PEMEL ist ähnlich, für PEMELs sind die Zelldesigns jedoch wenig stark kategorisierbar. Die PEMFC-Produktion umfasst vier Prozessschritte: Herstellung der BPP, der MEA, Montage der Dichtungen und das wiederholte Stapeln der verschiedenen Komponenten. Der Bedarf an den Systemen kann derzeit mit Kleinserien gedeckt werden, jedoch lassen sich die aktuell genutzten Prozesse nur schwer skalieren. Es besteht eine hohe Nachfrage nach verfügbaren Technologien zur Skalierung, da sowohl einzelne Prozesse als auch Produktionslinien im Aufbau sind. Ein Hemmnis zur schnelleren Skalierung ist die Notwendigkeit, die katalytische Schicht von Decals auf die Membran zu übertragen. Abhilfe schaffen direkte Beschichtungsverfahren, welche zusätzlich in einem flexiblen Maschinenkonzept verbaut, werden, um synergetische Energiespeicher Produktion zu ermöglichen. Ergänzt mit flexiblen, kontinuierlich betreibbaren Pick and Place Lösungen kann eine Plattform zur flexiblen MEA-Produktion geschaffen werden. Bezüglich der BPP kann im Wesentlichen zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Verfahren unterschieden werden. Beide Prozesse bieten individuell Vor- und Nachteile, welche eine Implikation auf die spätere Nutzung des Stacks haben.

In Summe zeigt sich, dass es ausreichend Forschungsansätze zur Verbesserung der bestehenden Produktionsanlagen gibt. Die produzierende Industrie muss diese Lösungen aufgreifen und neuartige Produktionslinien aufbauen. Mögliche Risiken hinsichtlich

Qualität und Zuverlässigkeit können durch Evaluationen auf bestehenden Maschinen reduziert und durch Daten untermauert werden. Nur durch die Weiterentwicklung der bestehenden, zugekauften Anlagentechnik und den Einsatz eigener Maschinenentwicklungen kann die europäische Industrie ihre Stärken ausspielen und einen globalen Mehrwert erzeugen.

Danksagungen

Teile der in diesem Beitrag vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen der Verbundforschungsprojekte „H2GIGA – FRHY: Aufbau einer hochratenfähigen Referenzfabrik für PEM-Elektrolyseure sowie Bewertung und Optimierung bestehender Produktionsverfahren für Elektrolyseurbauteile“ (03HY112B) und „H2GO - Aufbau einer dezentralen Produktionslinie für Brennstoffzellen“ (03B11027B), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie dem Verbundforschungsprojekte „FoFeBat“ (03XP0256, 03XP0416, 03XP0501A) gefördert.

6 Literatur

[1] „Wasserstoff und Brennstoffzellen: Antworten auf wichtige Fragen," O. Ehret, Berlin, 2018. Zugriff am: 18. Apr. 2023. [Online]. Verfügbar: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/180502_dossier-wasserstoff-und-brennstoffzellen_de_web.pdf

[2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz and Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. „Energie- und Umwelträte stellen die Weichen für eine klimaneutrale europäische Wirtschaft." bmuv.de. https://www.bmuv.de/pressemitteilung/energie-und-umweltraete-stellen-die-weichen-fuer-eine-klimaneutrale-europaeische-wirtschaft (Zugriff am: 18. Apr. 2023).

[3] Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg. „Datenservice Erneuerbare Energien." zsw-bw.de. https://www.zsw-bw.de/mediathek/datenservice.html (Zugriff am: 6. Apr. 2023).

[4] „Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg," U. Weichenhain *et al.,* München, 2020. Zugriff am: 6. Apr. 2023. [Online]. Verfügbar: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/Wasserstoff/200724-Potentialstudie-H2-Baden-Wuerttemberg-bf.pdf

[5] D. Greenwood. „Automotive Batteries 101." warwick.ac.uk. https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/business/automotive_batteries_101_wmg-apc.pdf (Zugriff am: 6. Apr. 2023).

[6] „Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle," H. H. Heimes *et al.,* Aachen, 2018. Zugriff am: 6. Apr. 2023. [Online]. Verfügbar: https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabcgujq

[7] „Umfeldbericht zum europäischen Innovationssystem Batterie 2022," B. Bürklin *et al.*, Karlsruhe, 2022. Zugriff am: 30 Mär. 2023. [Online]. Verfügbar: https://www.forschungsfertigung-batteriezelle.fraunhofer.de/content/dam/ipt/forschungsfertigung-batteriezelle/Dokumente/Fraunhofer_Umfeldbericht_Innovationssystem_Batterie_2022.pdf

[8] „Development perspectives for lithium-ion battery cell formats," S. Link *et al.*, Karlsruhe, 2022. Zugriff am: 30. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2022/Development_perspectives_for_lithium-ion_battery_cell_formats_Fraunhofer_2022.pdf

[9] P. Kurzweil, *Brennstoffzellentechnik: Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung.* 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.

[10] C. Mohrdieck, M. Venturi und K. Breitrück, „Mobile Anwendungen," in *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*, J. Töpler und J. Lehmann, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 59-113.

[11] J.-H. Wee, „Applications of proton exchange membrane fuel cell systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 11, Nr. 8, S. 1720–1738, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2006.01.005.

[12] Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho und X. Cordobes Adroher, „A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research," *Applied Energy*, Jg. 88, Nr. 4, S. 981–1007, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.09.030.

[13] U.S. Department of Energy. „Fuel Cells." energy.gov. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/fcto_fuel_cells_fact_sheet.pdf (Zugriff am: 6. Apr. 2023).

[14] A. D. Pranadi. „Fuel Cell Development for ASEAN: Flawless and Prospective Potential." aseanenergy.org. https://aseanenergy.org/fuel-cell-development-for-asean-flawless-and-prospective-potential/ (Zugriff am: 6. Apr. 2023).

[15] S. J. Peighambardoust, S. Rowshanzamir und M. Amjadi, „Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 35, Nr. 17, S. 9349–9384, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.05.017.

[16] L. Stroyov, S. Patel und R. Ali, „Innovative fuel cell deployment in telstra's network and key learnings from the field," in *Driving innovation in ICT energy infrastructure: INTELEC 2017, Gold Coast, Australia: 22-26 October 2017, Goldcoast Convention & Exhibition Centre, Broadbeach, Queensland, Australia*, 2017, S. 47–53, doi: 10.1109/INTLEC.2017.8211677.

[17] „Manufacturing Cost Analysis for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers," A. Mayyas, M. Ruth, B. Pivovar, G. Bender und K. Wipke, Golden, 2019. Zugriff am: 6. Apr. 2023. [Online]. Verfügbar: https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72740.pdf

[18] M. S. Thomassen, A. H. Reksten, A. O. Barnett, T. Khoza und K. Ayers, „Chapter 6 - PEM water electrolysis," in *Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications: Hydrogen Production by Water Electrolysis,* T. Smolinka und J. Garche, Hg., Amsterdam: Elsevier, 2022, S. 199-228.

[19] S. M. Saba, *Technische und ökonomische Bewertung der Polymer-Elektrolyt-Membran Elektrolyse* (Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Energie & Umwelt 570). Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2022.

[20] F. Duffner, L. Mauler, M. Wentker, J. Leker und M. Winter, „Large-scale automotive battery cell manufacturing: Analyzing strategic and operational effects on manufacturing costs," *International Journal of Production Economics*, Jg. 232, Art.-Nr. 107982, 2021, doi: 10.1016/j.ijpe.2020.107982.

[21] F. Degen und M. Schütte, „Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 330, Art.-Nr. 129798, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129798.

[22] F. Bennemann, G. Schuh, T. Latz und M. Hedemann, „Innovation potentials and courses for action in the production of lithium-ion battery cells in Europe," in *14th International Expert Forum. Conference on electric vehicle drives and e-mobility 2022,* 2022, S. 119-126.

[23] B. D. James. „2019 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Review Presentation: Fuel Cell Systems Analysis." hydrogen.energy.gov. https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review19/fc163_james_2019_o.pdf (Zugriff am: 6. Apr. 2023).

[24] L. Jörissen und J. Garche, „Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEFC) Stand und Perspektiven," in *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*, J. Töpler und J. Lehmann, Hg., 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 263–313.

[25] F. Siegel, „Tiefdruckverfahren zur Herstellung von Katalysatorschichten für (PEM) Brennstoffzellen," Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2015. [Online]. Verfügbar: https://monarch.qucosa.de/api/qucosa%3A20464/attachment/ATT-0/

[26] T. Kaz, „Herstellung und Charakterisierung von Membran-Elektroden-Einheiten für Niedertemperatur Brennstoffzellen," Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2008. [Online]. Verfügbar: http://dx.doi.org/10.18419/opus-1777

[27] „The Relevance of Fuel Cells for Mobility Applications: Discussion Paper," C. Baum *et al.,* Aachen, 2021. Zugriff am: 6. Apr. 2023. [Online]. Verfügbar: https://doi.org/10.24406/IPT-N-633591

[28] tesa SE. „Gemeinsam für die Mobilität der Zukunft." tesa.com. https://www.tesa.com /de-de/ueber-uns/press-insights/presse/together-for-the-mobility-of-the-future.html (Zugriff am: 30. Mär. 2023).

[29] A. Bendzulla, *Von der Komponente zum Stack: Entwicklung und Auslegung von HT-PEFC-Stacks der 5 kW-Klasse* (Schriften des Forschungszentrums Jülich: Reihe Energie & Umwelt 69). Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2010.

[30] P. E. Santangelo, M. Cannio und M. Romagnoh, „Review of Catalyst-deposition Techniques for PEMFC Electrodes," *Tecnica Italiana - Italian Journal of Engineering Science*, Jg. 63, Nr. 1, S. 65–72, 2019, doi: 10.18280/ti-ijes.630109.

[31] M. Thomitzek, N. von Drachenfels, F. Cerdas, C. Herrmann und S. Thiede, „Simulation-based assessment of the energy demand in battery cell manufacturing," *Procedia CIRP*, Jg. 80, S. 126–131, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.01.097.

[32] „Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles: Third Edition," P. A. Nelson, S. Ahmed, K. G. Gallagher und D. W. Dees, Alexandria, 2019. Zugriff am: 6. Apr. 2023. [Online]. Verfügbar: https://doi.org/10.2172/1503280

Die Inhalte für den Vortrag 2.3 erarbeiteten die Autor:innen mit weiteren Expert:innen in dieser Arbeitsgruppe:

Dr. Kai Bär, adphos Innovative Technologies GmbH, Bruckmühl

Dr. Thomas Bastuck, Vulkan Technic GmbH, Wiesbaum

Prof. Dr. Christian Brecher, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT,

Aachen Dr. Henning Janssen, Fraunhofer IPT, Aachen

Marlin Kersting, Fraunhofer IPT, Aachen

Sarah Rieck, Fraunhofer IPT, Aachen

Dr.-Ing. Stephan Witt, Jagenberg AG, Krefeld

Daniel Zontar, Fraunhofer IPT, Aachen

Session 3

Production-as-a-service

3.1 Nachhaltigkeit in Produktionslinien

C. Brecher, M. Fey, M. Loba, O. Malinowski, J. Ochel, J. Schäfer, A. Steinert, M. Wittmann

Gliederung

1 Herausforderungen nachhaltiger Produktionslinien....216
1.1 Bestehende Ansätze zur Realisierung nachhaltiger Produktionslinien....217
1.2 Zielgrößen nachhaltiger Produktionslinien....218
2 Senkung der Grundlast von Nebenaggregaten....220
3 Bedarfsorientierter Einsatz von Nebenaggregaten....223
4 Minimierung der Prozesszeit....229
4.1 Wissensbasierte Prozessoptimierung....230
4.2 Modellbasierte Prozessoptimierung....233
5 Verlängerung der Nutzungsphase....235
5.1 Identifikation von gebrauchsdauerreduzierenden Betriebszuständen....236
5.2 Erweiterte Lebensdauerberechnung von Kugelgewindetrieben....239
5.3 Befähigung zur optimierten Kreislaufwirtschaft....241
6 Vision einer gemeinsamen Datennutzung....241
7 Zusammenfassung und Ausblick....242
8 Literatur....244

doi: 10.24406/publica-964

Kurzfassung

Nachhaltigkeit in Produktionslinien

Tiefgreifende globale Veränderungsprozesse haben die Forderung nach nachhaltigem Handeln verstärkt. Für eine erfolgreiche Gestaltung der Nachhaltigkeitstransformation in der Produktion liegt ein Schlüssel in der Minimierung des gesamtheitlichen Ressourceneinsatzes. Vor diesem Hintergrund wird es nicht nur erforderlich sein, eine ressourcenschonende Herstellung von Produkten zu etablieren, sondern auch die Anzahl eingesetzter Produktionsmitteln zu reduzieren. Diese Reduktion muss einhergehen mit der vollständigen Ausnutzung des theoretischen technischen Potentials, da sonst der erforderliche Bedarf an herzustellenden Gütern nicht mit einer reduzierten Anzahl an Produktionsmitteln gedeckt werden kann. Um diesen nachhaltigen Grundgedanken mit unternehmerischen Interessen zu harmonisieren, sind monetäre Anreize in Form neuer Geschäftsmodelle zu schaffen.

Die formulierten Zielsetzungen können in Produktionslinien adressiert werden, wenn folgende drei Ansätze verfolgt werden: Effizientere Nutzung, Verlängerung der Nutzungsphase und Kreislaufwirtschaft von Produktionsmitteln. Eine durchgängige und übergreifende Verfügbarkeit von Daten und Expertenwissen entlang des gesamten Lebenszyklus ermöglicht, die Nachhaltigkeit ganzheitlich zu bewerten und fundierte Optimierungsszenarien zu identifizieren. Das AWK‘23 präsentiert konkrete Anwendungsfälle, die durch unterschiedliche Maßnahmen innerhalb der drei Ansätze zu einer nachhaltigen und zugleich zukunftsfähigen Produktion beitragen.

Schlagwörter: Ressourcenminimierung, Effizienzsteigerung, Nutzungsphase, Kreislauf, Datenverfügbarkeit

Abstract

Sustainability in Production Lines

Profound global change processes have intensified the demand for sustainable action. One key to successfully designing the sustainability transformation in production is to minimize the overall use of resources. Against this background, it will not only be necessary to establish resource-efficient manufacturing of products, but also to reduce the number of product means in circulation. By optimizing the utilization of the theoretical potential of product means currently in use, it will be possible to meet the current demand of products even with a reduced number of product means. In order to harmonize this basic sustainable idea with entrepreneurial interests, monetary incentives in the form of new business models must be created.

The formulated objectives can be addressed in production lines when the following three approaches are pursued: more efficient use, extension of the use phase and circular economy of production means. A consistent and overarching availability of data and know-how along the entire life cycle makes it possible to evaluate sustainability holistically and identify well-founded optimization scenarios. AWK’23 presents concrete use cases that contribute to sustainable and at the same time future-proof production through different measures within the three approaches.

Keywords: resource minimization, efficiency increase, use phase, circulation, data availability

1 Herausforderungen nachhaltiger Produktionslinien

Der bisherige wirtschaftliche Erfolg von produzierenden Unternehmen ist eng geknüpft an einen maximalen Produktabsatz und damit einem hohen Einsatz von Ressourcen bei der Produktion. Dieses unternehmerische Grundverständnis hat im Laufe der Industrialisierung zu einer Überproduktion geführt, wodurch Stückkosten minimiert und Umsätze maximiert werden konnten. Durch diese Überproduktion ist die Nachfrage an Produkten zwar gedeckt, insbesondere wird aber der gesellschaftlich sinnvolle Bedarf überstiegen. Tiefgreifende globale Veränderungsprozesse haben in den letzten Jahren die Forderung nach einem nachhaltigen Handeln verstärkt.

Mit der einhergehenden Nachhaltigkeitstransformation entlang der FESG-Faktoren (Financial, Environmental, Social, Governmental) sieht sich auch die Produktionsbranche konfrontiert. Innerhalb einer nachhaltigen Marktwirtschaft wird sich das produzierende Gewerbe großen Herausforderungen entgegenstellen und ein neues Grundverständnis zur nachhaltigen Unternehmensführung entwickeln müssen. Für Unternehmen wird es erforderlich sein, mit minimalem Ressourceneinsatz den gesellschaftlich sinnvollen Bedarf an Gütern und Dienstleistungen, z. B. an Mobilität oder Fertigungskapazität, bereitzustellen und nicht wie bisher den maximal möglichen Produktabsatz anzustreben. Weiterhin ist ein langfristiges Ziel der nachhaltigen Marktwirtschaft, die Anzahl der sich im Umlauf befindlichen Produkte zu reduzieren. Durch eine optimierte Ausnutzung der theoretischen Potentiale der derzeit genutzten Produkte kann auch bei einer reduzierten Anzahl der bisherige Bedarf gedeckt werden.

In Hinblick auf Produktionsanlagen bedeutet dies konkret, dass Produkte ressourcenschonend hergestellt werden müssen und eine geringere Anzahl von Produktionsmitteln die Nachfrage decken muss. Zur nachhaltigen Erreichung der formulierten Zielsetzungen ist es erforderlich, dass Produktionsmittel effizienter (1) und länger (2) genutzt werden. Zugleich müssen die Produktionsmittel am Ende eines Nutzungszyklus einen Weg in die Kreislaufwirtschaft finden (3). (vgl. Abbildung 1)

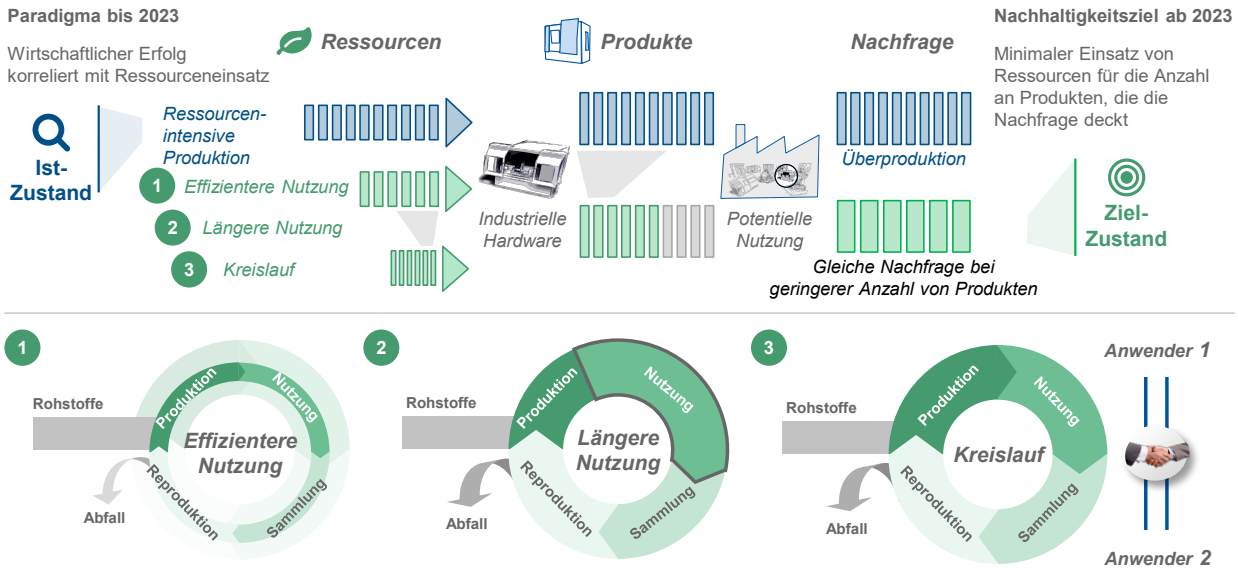


Abbildung 1: Status Quo und Szenarien zur Steigerung des Nachhaltigkeitsbeitrags

1.1 Bestehende Ansätze zur Realisierung nachhaltiger Produktionslinien

Das AWK‘23 baut auf einer langen Historie umfangreicher Forschungsarbeiten auf, die sich alle im weitesten Kontext mit der Digitalisierung der Produktionstechnik beschäftigten. Viele Konzepte und Vorgehen werden bereits mehrere Jahre in Konsumgütern eingesetzt und erhalten häufig mit einer gewissen Verzögerung Einzug in die Produktionstechnik. So können in den letzten Jahren Parallelen zu der Routenplanung von Google gezogen werden (vgl. Abbildung 2). Beginnend mit physikalischem *Modellwissen* wurden zunächst Modelle geschaffen, die a priori Vorhersagen ermöglichen. Neben den auftretenden Prozesskräften [1], [2] lassen sich auch die zu erwartende Lebensdauer einzelner Komponenten [3] prognostizieren. Basierend auf geometrischen Modellen der Produktionsmaschine sind zudem frühzeitige Kollisionserkennungen des durchzuführenden Prozesses möglich [4]. All diese Modelle befähigen aus Fertigungssicht zu einer ersten Prognose der zu fahrenden Fertigungsroute, bilden jedoch nicht stochastische Effekte und den daraus resultierenden Realzustand ab. Bei der Routenplanung stellt dieses Modellwissen die Straßenkarte dar. Es lässt sich zwar die zu fahrende Route planen und die theoretische Ankunftszeit vorhersagen, jedoch können keine Staus oder Baustellen berücksichtigt werden. Hierzu werden *datenkombinierte Modellansätze* benötigt, die Live Daten nutzen. Während diese Daten in der Routenplanung Mobilfunk- oder GPS-Daten von Fahrzeugen sind, sind es in der Produktion Maschinen- und Qualitätsdaten. Durch die Kombination dieser Daten mit domänenspezifischem Modellwissen lassen sich die real auftretenden Prozesskräfte [5], [6] und die daraus resultierenden Belastungen am Werkzeug und den Maschinenkomponenten bestimmen. In der Praxis befähigt dies in Zusammenhang mit einem Steifigkeitsmodell und einer Materialabtragsimulation zu einer prozessparallelen Überwachung der Bauteilqualität [7]. Durch das Anbringen zusätzlicher Sensorik kann eine weitere Verbesserung der Vorhersage erzielt werden [8]. Bei diesen datenkombinierten Modellansätzen handelt es sich zunächst ausschließlich um eine Direktanalyse der aktuellen Ist-Situation, die kein Lernen für zukünftige Prozessvorhersagen ermöglicht [9]. Hierzu werden (hybrid) *lernende Modellansätze* benötigt, die basierend auf historischen Ereignissen Vorhersagen treffen. In Bezug auf die Routenplanung bedeutet dies das Einbeziehen von historienbasierten Daten, bspw. Schulferien, regionale Sport- und Musikereignisse oder Wetterbedingungen. Im Hinblick auf die Fertigungsplanung wird auf diese Weise neben der Vorhersage von Verschleißzuständen der Werkzeuge [10] oder der Maschinenkomponenten [11], auch die genauere Vorhersage von Prozesskräften ermöglicht [12]–[15]. Die bisherigen Modellansätze dienen hauptsächlich der Vorhersage und Optimierung von Zeiten, bspw. Fahrt- oder Prozesszeiten. Zukünftige *nachhaltige Modellansätze* hingegen müssen den Lösungsweg zunehmend mit dem Fokus der ökologischen Nachhaltigkeit betrachten und eine Verwendung der notwendigen Ressourcen minimieren. Dies bedeutet konkret eine Minimierung des CO_2-Ausstoßes pro Produktherstellung oder analog pro Fahrt bei der Routenplanung. In der Routenplanung wird das bereits durch Google realisiert. Basierend auf einem prognostizierten CO_2-Austoß erfolgt die Routenoptimierung. Hierbei ist nicht zwangsläufig die schnellste und kürzeste Route die Umweltschonendste. Faktoren, die diese Bilanz beeinflussen, sind die Anzahl und die Größe der Steigungen sowie die Anzahl der notwendigen Halte bspw. durch Ampeln. Um diesen Ansatz in die Produktionstechnik zu übertragen, müssen Maschinen und ihre Fertigungsprozesse untereinander ökologisch bewertbar und Informationen zur Optimierung übergreifend verfügbar sein. Erst infolgedessen kann die nachhaltigste Fertigungsroute gewählt werden.

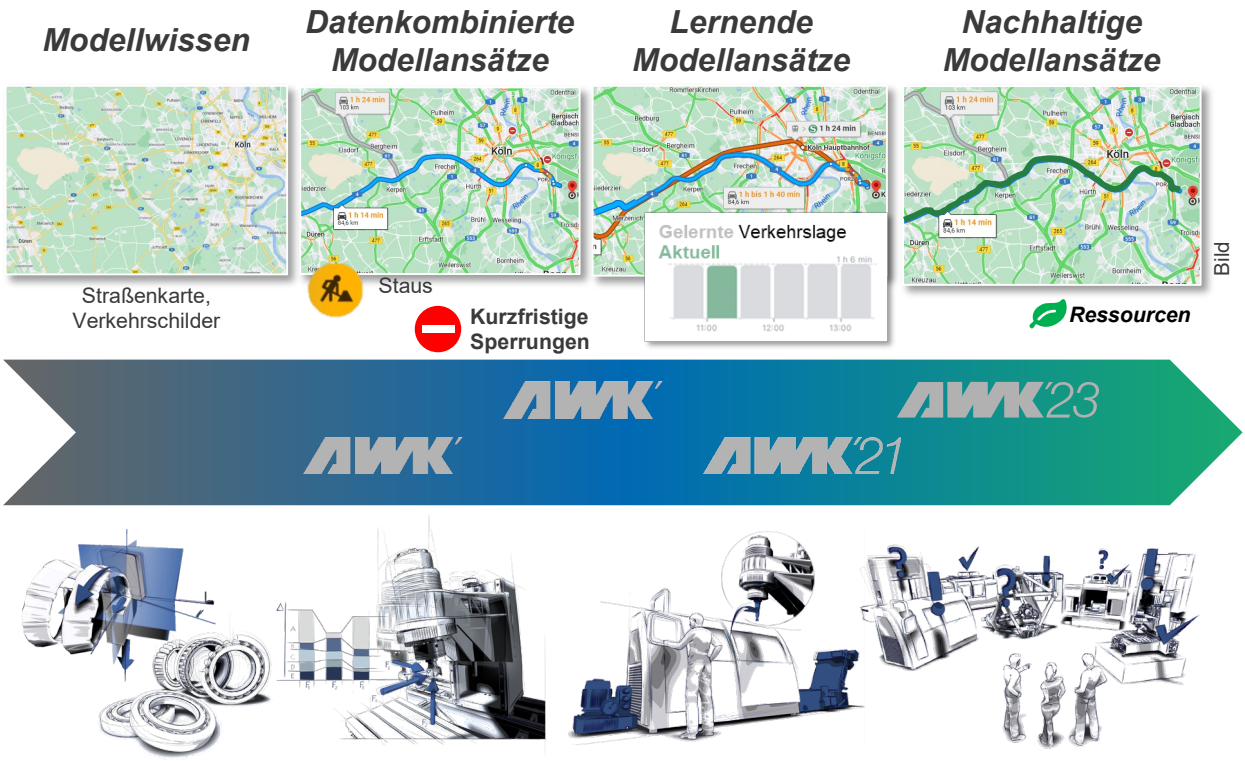


Abbildung 2: Analogiebild Routen- und Fertigungsplanung

1.2 Zielgrößen nachhaltiger Produktionslinien

Eine fundierte Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit erfordert eine Ökobilanz für den gesamten Lebenszyklus einer Produktionslinie. Der Lebenszyklus umfasst die Abschnitte Rohstoffgewinnung, Herstellung, Transport, Nutzung, Entsorgung und Recycling. Erst die durchgängige Verfügbarkeit der relevanten Daten in den Bereichen ermöglicht, relevante Treiber des Ressourcenverbrauchs zu identifizieren und die größten Optimierungspotenziale aufzudecken. Nachfolgend soll der Beitrag einen besonderen Fokus auf die Werkzeugmaschine als ein wesentlicher Bestandteil einer Produktionslinie setzen. Studien in den letzten Jahren haben gezeigt, dass ein Großteil der Umweltauswirkungen von Werkzeugmaschinen während der Nutzungsphase hervorgerufen werden (94-99 %). Hierbei trägt mit 99 % die elektrische Energie den größten Anteil. [16] Der Energieumsatz in der Nutzungsphase ist demnach relevanter Treiber des Ressourcenverbrauchs während des Lebenszyklus einer Werkzeugmaschine. Zur Reduktion des Ressourceneinsatzes ist somit eine effizientere Nutzung der Werkzeugmaschine von besonderer Bedeutung. Infolgedessen ist eine Betrachtung der zeitlichen Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine während der Nutzungsphase sinnvoll, um den Energieverbrauch der Werkzeugmaschine nach ihren Komponenten und Betriebszuständen aufzuschlüsseln und konkrete Optimierungsmaßnahmen abzuleiten.

In Abbildung 3 wird im oberen Bereich exemplarisch die Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine im Produktivbetrieb dargestellt. Das Diagramm zeigt die prozentualen Anteile der Haupt- und Nebenaggregate der Maschine an der Gesamtleistungsaufnahme. Als Hauptaggregate sind die Komponenten zu verstehen, die direkt an der Prozessausführung und dem Wertschöpfungsprozess beteiligt sind. Dazu zählen die Hauptspindel, die Vorschubachsen und die Steuerung. Nebenaggregate sind hingegen Hilfssysteme, die eine prozessunterstützende Funktion innehaben. Kühlung, Kühlschmierstoffaufbereitung und -versorgung sowie Hydraulik können beispielsweise hier verordnet werden.

[17], [18] Im unteren Bereich der Abbildung wird die Leistungsaufnahme der Haupt- und Nebenaggregate schematisch für verschiedene Zeitabschnitte während der Nutzungsdauer einer Maschine veranschaulicht. Zu sehen sind hierbei die Leistungsaufnahme während der Warmlaufphase vor Bearbeitungsbeginn, des Produktivbetriebs und der gesamten Einsatzdauer bis zum Maschinenausfall, hier bedingt durch ein Spindelversagen. Während der Nutzungsphase einer Werkzeugmaschine treten unterschiedliche Verbrauchsarten auf. Eine Aufteilung des Energieverbrauchs kann in fixe und variable Anteile erfolgen. Der fixe Energieanteil ist prozessunabhängig und wird als Grundlast definiert. Diese Grundlast ist auf die Nebenaggregate zurückzuführen. Der variable Anteil hingegen ist vom Prozess abhängig. Variable Verbräuche treten vornehmlich durch die Hauptaggregate auf.

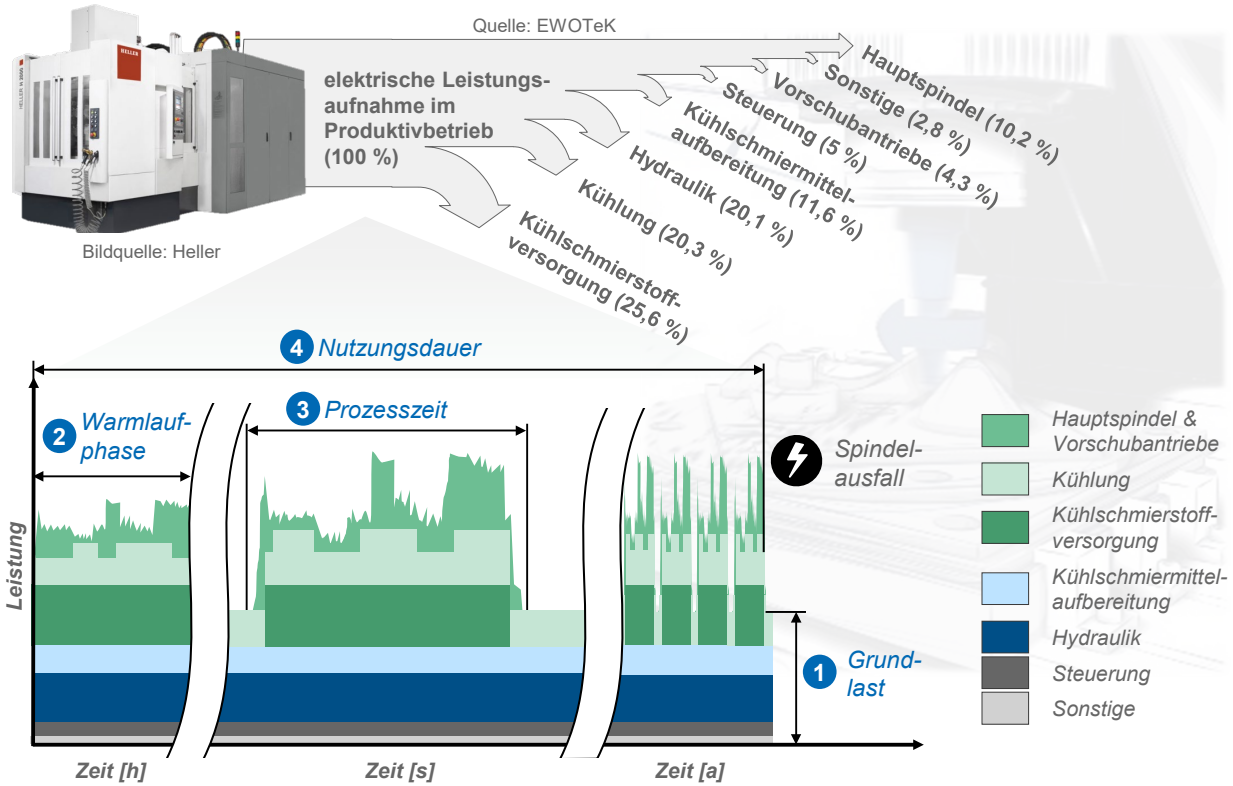


Abbildung 3: Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine im Produktivbetrieb nach [17] und Optimierungsansätze entlang einer Nutzungsphase

Abbildung 3 verdeutlicht, dass auf die Nebenaggregate ein erheblicher Anteil des Energieverbrauchs während der Nutzungsphase einer Produktionsanlage entfällt. Zu den größten Verbrauchern zählen vornehmlich Kühlung, Hydraulik und Kühlschmierstoffversorgung. Für eine ganzheitliche Optimierung der Nebenaggregate lassen sich zwei Ziele ableiten: Der Einsatz energieeffizienter Systeme und der bedarfsorientierte Betrieb energieeffizienter Systeme. Um die prozessunabhängige Grundlast der Nebenaggregate zu verringern, ist der Einsatz energieoptimierter Systeme erforderlich. Diese Systeme gilt es im nächsten Schritt adaptiv zu gestalten, um einen bedarfsorientierten Betrieb zu ermöglichen.

Unter Hinzunahme weiterer Parameter zur gesamtheitlichen Optimierung des Ressourceneinsatzes ist als dritte Zielgröße ist die Minimierung der Prozesszeit zu nennen. Hierdurch wird die Betriebsphase von Haupt- und Nebenaggregaten und somit der Energieverbrauch pro Bauteil verkürzt. Untersuchungen der letzten Jahre haben gezeigt (vgl.

Tabelle 1), dass der Energieverbrauch für die Hauptaggregate wie Spindel oder Vorschubachsen durch eine Verkürzung der Prozesszeit zwar steigen kann, der Energieverbrauch der Grundlast allerdings zeitgleich in signifikant größerem Ausmaß sinkt. [17]–[20]

Als letzte Zielgröße ist die Maximierung der Nutzungsdauer von Maschinen und relevanten Komponenten festzuhalten. Hierbei stehen vor allem Verschleißkomponenten wie Antriebssysteme oder die Hauptspindel im Fokus, deren Ausfall vermieden werden soll. An dieser Stelle ist Expertenwissen für eine präzise Prognose von Zustand und Lebensdauer in Abhängigkeit der Betriebsparameter notwendig. Hierdurch wird ebenfalls erleichtert, dass Komponenten nach ihrem Nutzungszyklus einen Weg in die Kreislaufwirtschaft finden, da Zustände der Komponenten genauer bekannt sind und weniger Schäden oder Ausfälle auftreten.

Bei einer Analyse und Bewertung des Energieverbrauchs einer Werkzeugmaschine während der Nutzungsphase lassen sich zusammenfassend vier Zielgrößen zur Minimierung des Energieverbrauchs pro Bauteil und damit für eine Nachhaltigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen festhalten (vgl. Abbildung 3 unten):

Ziel 1: Einsatz energieeffizienter Nebenaggregate (Kapitel 2)
Ziel 2: Bedarfsorientierter Betrieb energieeffizienter Nebenaggregate (Kapitel 3)
Ziel 3: Minimierung der Prozesszeit (Kapitel 4)
Ziel 4: Verlängerung der Nutzungsphase (Kapitel 5)

Die Umsetzung der vier Zielgrößen kann weitere sekundäre, nachhaltigkeitssteigernde Effekte bewirken. Beispielhaft kann bei bedarfsorientiertem Betrieb der Nebenaggregate durch ein optimiertes Temperaturmanagement die bisher erforderliche Hallenklimatisierung minimiert werden. Die Reduktion von thermischen Schwankungen im Betrieb erhöht zusätzlich die Maschinengenauigkeit, sodass Ausschuss durch Qualitätsmängel reduziert wird. Infolge einer höheren Produktivität durch Minimierung der Prozesszeit ist in einem nächsten Schritt möglich, Produktionsanlagen einzusparen. Für den reduzierten Maschinenpark ist außerdem eine geringere zu klimatisierende Hallenfläche erforderlich.

Alle Ziele und mögliche daraus resultierende Effekte haben nicht nur einen ökologischen, sondern auch ökonomischen Nutzen für produzierende Unternehmen, sodass die Realisierung dieser Ziele für Unternehmen zu einem Wettbewerbsvorteil führt. Übergeordnet können die genannten Zielgrößen zu einer nachhaltigen und zugleich zukunftsfähigen Produktion beitragen.

2 Senkung der Grundlast von Nebenaggregaten

Durch den Einsatz energieeffizienter Nebenaggregate kann eine Senkung der fixen, prozessunabhängigen Grundlast erzielt werden (vgl. Abbildung 4). Die Entwicklung und der Einsatz solcher Systeme zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs wurden in den vergangenen Jahren ausgiebig erforscht. Bereits im Jahr 2011 stellte das AWK Maßnahmen zur Optimierung der Energieeffizienz dieser Aggregate vor und war damit Vorreiter in der Gestaltung einer grünen Produktion. Vor dem Hintergrund einer Verknappung von Rohstoffen und steigenden Energiepreisen war die Zielsetzung der Steigerung der Ressourceneffizienz hier vor allem wirtschaftlich motiviert. Ein effizienter Umgang mit den eingesetzten Ressourcen, wie Energie, Rohmaterial oder Kühlschmiermittel, konnte eine direkte Steigerung der Wirtschaftlichkeit erzielen. Dennoch war eine Ressourceneffizienz

nicht die finale Zielgröße, hinsichtlich der die Fertigung optimiert wurde, weshalb viele Forschungsergebnisse bis jetzt nicht den Weg in die Industrie gefunden haben.

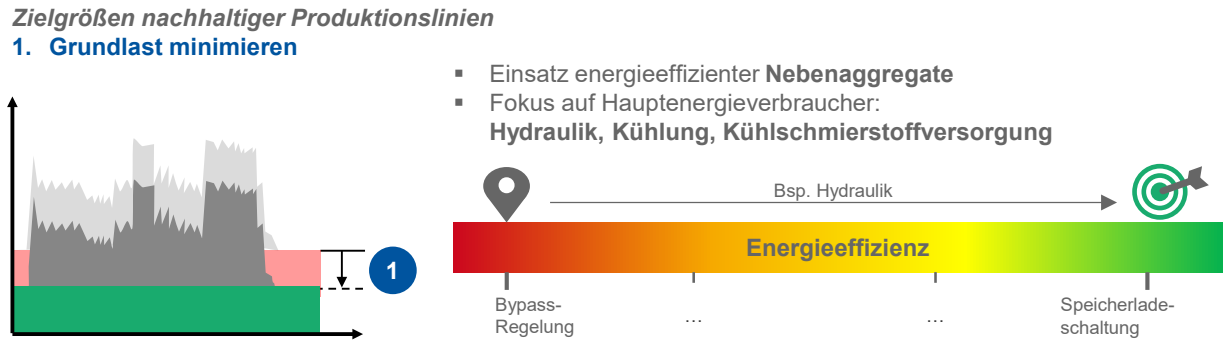


Abbildung 4: Minimierung der Grundlast als Zielgröße nachhaltiger Produktionslinien

Infolge der in den letzten Jahren gestiegenen Forderungen nach einem nachhaltigen Handeln entwickelt sich die ökologische Nachhaltigkeit heute zu einem zentralen Bewertungspunkt in der Industrie. Die bereits vorhandenen Optimierungsvorschläge und -maßnahmen zur Senkung der Grundlast der Nebenaggregate eröffnen die Möglichkeit, unmittelbar Energieeinsparpotentiale auszunutzen und den Energieverbrauch in Produktionslinien bei breitflächiger Umsetzung erheblich zu minimieren. Ergebnisse aus verschiedenen Forschungsarbeiten und -projekten [17]–[20] stellen unter Beweis, dass die Realisierung von Optimierungsszenarien für Nebenaggregate an unterschiedlichen Werkzeugmaschinen zu großen Energieeinsparungen führt (vgl. Tabelle 1). Für Kühlung, Hydraulik und Kühlschmierstoffversorgung werden nachfolgend beispielhaft einige dieser im Vergleich zum Standardsystem energieeffizienteren Lösungen vorgestellt, die auch an bereits eingesetzten Maschinen noch umgesetzt werden können. Zusätzliche Kosten, die mit diesen Lösungen verbunden sind, amortisieren sich durch die Einsparung von Energiekosten.

Tabelle 1: Energieoptimierung von Werkzeugmaschinen [18]

				Optimiert		
Projekt	***Gesamt-verbrauch***	***Haupt-aggregate***	***Neben-aggregate***	***Gesamt-verbrauch***	***Haupt-aggregate***	***Neben-aggregate***
EWO-TeK [17]	6,25 kWh	19 % ~1,19 kWh	81 % ~5,06 kWh	4,38 kWh	24 % ~1,05 kWh	76 % ~3,33 kWh
Maxiem [19]	0,78 kWh	14 % ~0,11 kWh	86 % ~0,67 kWh	0,38 kWh	29 % ~0,11 kWh	71 % ~0,27 kWh
NCPlus [20]	22,3 kWh	23 % ~5,13 kWh	77 % ~17,17 kWh	15,6 kWh	37 % ~5,77 kWh	63 % ~9,83 kWh

Hydraulik

Aus Kostengründen werden heute häufig Hydraulikaggregate mit Konstantpumpe und Konstantmotor eingesetzt. Die Pumpe stellt dauerhaft ein konstantes Volumen bereit und

der Motor wird dauerhaft mit konstanter Drehzahl betrieben. Demzufolge ist die Leistungsaufnahme dieser Hydraulikaggregate über die gesamte Bearbeitung konstant, wenngleich eine hydraulische Funktion oftmals nur kurzzeitig und teilweise mit großem zeitlichem Abstand ausgeführt wird. Um variable Volumenströme fördern zu können, ist das Aggregat um einen Bypass erweitert. Über den Bypass strömt dann ein Teil des bereitgestellten Hydraulikfluids ungenutzt zurück in Tank. Während der Druckhaltefunktion, bei der kein Volumenstrombedarf besteht, wird der gesamte Volumenstrom ungenutzt zurückgeleitet. Effizientere Systeme sind Hydraulikaggregate mit Verstellpumpe und konstant laufendem Antriebsmotor, mit Drehzahlregelung oder mit Speicherladeschaltung. Die Ausführungen ermöglichen den Leistungsbedarf zum Aufrechterhalten eines konstanten Betriebsdrucks während der Druckhaltefunktion zu reduzieren. Hierbei können optimierte Hydraulikaggregate, die nach dem Prinzip der Speicherladeschaltung arbeiten, den Leistungsbedarf während der Druckhaltefunktion sogar auf Null senken und stellen damit die energieeffizientesten Systeme dar. Solche Aggregate setzen sich aus Pumpe, Druckspeicher und Speicherladeventil zusammen. In Teil- oder Nulllastphasen kann der Druckspeicher von der Pumpe befüllt werden. Bei vollständig beladenem Speicher schaltet die Pumpe in den Leerlaufzustand oder komplett ab und die Energieversorgung des Hydrauliksystems wird durch den Druckspeicher übernommen. Während der Druckhaltefunktion ist dadurch eine vollständige Abschaltung von Motor und Pumpe möglich.

Kühlung

Wesentliche Bestandteile eines Kühlaggregats sind Verdichter, Pumpe und Lüfter, wobei die dominierende Leistungsaufnahme der Kühlung sich beim Verdichter wiederfindet. Um das große Energieeinsparpotential realisieren zu können, ist die Energieeffizienz von Kühlaggregaten mit unterschiedlichen Verdichterausführungen zu beurteilen. Neben der Energieeffizienz eines Kühlaggregats ist ebenso die Genauigkeit der Temperaturregelung des Kühlwasserfluids von zentraler Bedeutung, um Genauigkeitsanforderungen an den Prozess gerecht zu werden. Eine Regelstrategie könnte beispielhaft vorsehen, die Kühlwasservorlauftemperatur mit einer gewissen Hysterese zu regeln. Die erforderliche Präzision des Bearbeitungsprozesses definiert hierbei die Größe der Hysterese. Energieeffiziente Aggregate sind solche mit getaktetem Verdichter (Zweipunkt-Regelung). Verdichter und Lüfter arbeiten im Nennbetriebspunkt bis das Minimum der Hysterese erreicht wird. Dann schalten sie ab, bis das Maximum der Hysterese wieder erreicht wird. Währenddessen läuft die Pumpe fortlaufend im Nennpunkt. Bei hochpräzisen Bearbeitungsprozessen mit geringer Hysterese muss aufgrund der begrenzten Anzahl erlaubter Schaltvorgänge des Verdichters beispielsweise auf ein größeres Tankvolumen des Kühlfluids zurückgegriffen werden. Um allerdings weiterhin die Anforderungen nach einem kompakten Kühlaggregat zu erfüllen, werden vielmals Systeme mit Heißgas-Bypass-Verdichter eingesetzt. Dieser Verdichter weist durchgängig seine maximale Leistungsaufnahme auf. Um bei Bedarf überschüssige Kühlleistung abzuführen, wird das verdichtete, heiße Kältemittel nach dem Verdichter über einen Bypass vor dem Verdampfer eingespritzt. Auf diesem Weg wird Kühlleistung dissipiert und kann stufenlos reguliert werden. Um der schlechten Energieeffizienz der Heißgas-Bypass-Methode zu begegnen und

gleichzeitig ein kompaktes Kühlsystem einzusetzen, sind Kühlaggregate mit frequenzgeregeltem- und digitalem Scroll-Verdichter zu bevorzugen.

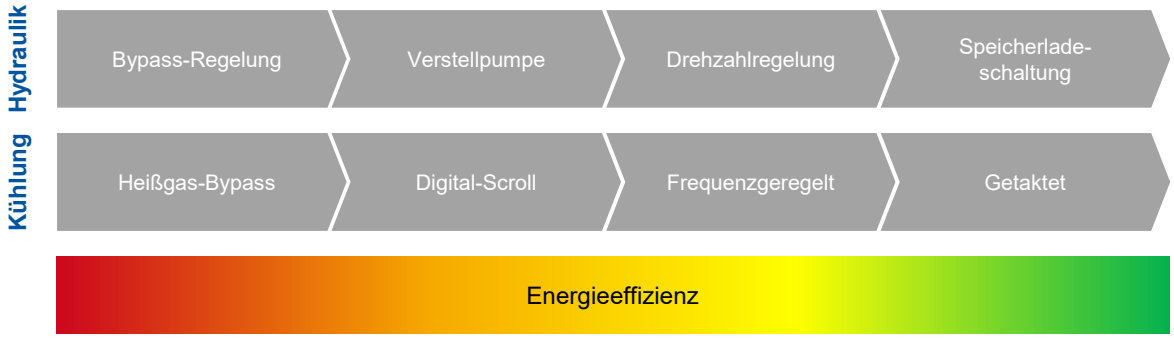


Abbildung 5: Verschiedene Hydraulik- und Kühlsysteme und ihre Energieeffizienz nach [21]

Kühlschmierstoffversorgung

Neben der Kühlung und der Hydraulik gehört die Kühlschmierstoffversorgung zu den primären elektrischen Verbrauchern. Um den Energieverbrauch der eingesetzten Pumpen zu reduzieren, kann eine bedarfsgerechte Medienversorgung zielführend sein. Auch im Bereich der Kühlschmierstoffversorgung kommen in bereits eingesetzten Werkzeugmaschinen teilweise immer noch Systeme mit Bypassregelung zum Einsatz, die für viele Betriebszustände der Maschine überdimensioniert und energetisch ineffizient sind. Die Ursache hierfür ist darin zu finden, dass eine Maschine auf das bei maximal auftretenden Anforderungen benötigte Kühlschmierstoffvolumen ausgelegt wird. Während der überwiegenden Zeit der Bearbeitung liegen allerdings geringere Anforderungen und demzufolge ein geringer Bedarf an Kühlschmierstoff (KSS) vor. Der Großteil des bereitgestellten KSS strömt in diesem Fall ungenutzt über den Bypass zurück in den Tank und es wird unnötig Wärme in den KSS eingetragen. Der Energieverbrauch der Pumpe ist dabei unabhängig von Prozess und Betriebszustand der Maschine [22]. Um das hohe Energieeinsparpotential auszunutzen, können druckgeregelte, drehzahlvariable Pumpen zur Anwendung kommen. Der geförderte Volumenstrom wird hier über die Pumpendrehzahl bestimmt, die durch einen Frequenzumrichter eingestellt wird. Es wird nur das für den Anwendungsfall erforderliche KSS-Volumen bereitgestellt.

3 Bedarfsorientierter Einsatz von Nebenaggregaten

Die Reduzierung der Grundlast auf Basis einer energetischen Optimierung von Nebenaggregaten hat keine direkten Auswirkungen auf den Fertigungsprozess. In einem darauf aufbauenden Schritt ist denkbar, die Betriebsphase entsprechender Aggregate zu optimieren. Im Gegensatz zur Grundlastminimierung wirken sich Maßnahmen in diesem Bereich allerdings unmittelbar auf den Fertigungsprozess aus. Die Betriebsparameter von Nebenaggregaten sind somit nicht nur mögliche Stellgrößen zur Effizienzsteigerung, sondern zählen auch zu den zentralen Stellgrößen zur Beeinflussung des Maschinenbetriebs. Eine Optimierung des Betriebsverhaltens von Nebenaggregaten kann deshalb nur auf Grundlage einer ganzheitlichen Bilanzierung erfolgen. Dabei ist ein Optimierungsproblem zu lösen, da eine Reduktion der elektrischen Leistungsaufnahme in der Regel mit einer reduzierten Leistungsfähigkeit und damit verringerten Funktionserfüllung verbunden ist.

Da eine Vielzahl nicht planbarerer Randbedingungen einen Fertigungsprozess beeinflussen kann, ist eine a priori-Auslegung meist nicht möglich. Stattdessen ist die Fähigkeit, flexibel und vor allem unmittelbar auf veränderte Randbedingungen reagieren zu können, zentraler Baustein im Rahmen der Optimierung. Vor diesem Hintergrund kann der Aufbau intelligenter, adaptiv arbeitender Nebenaggregate als Befähiger formuliert werden, den Konflikt aus Energieeinsatz, Produktivität und Qualität zu lösen.

Am Beispiel aktiver Kühlsysteme von Werkzeugmaschinen lässt sich dieses Konzept gut nachvollziehen. In modernen Anlagen kommen diesem Nebenaggregat zwei zentrale Aufgaben zu:

1. Kühlung elektrischer Antriebe zur Maximierung der Leistungsdichte
2. Temperierung von Strukturbauteilen zur Minimierung thermo-elastischer Verformungen

Heute erreichbare Zerspanleistungen wären ohne den Einsatz aktiver Kühlsysteme, beispielsweise in der Hauptspindel, nicht denkbar (1). Gleichzeitig gewährleistet die gezielte Temperierung, dass auch im Hochproduktivbetrieb geforderte Bauteiltoleranzen eingehalten werden können (2). Dazu wird das aus mehreren Kreisläufen bestehende Kühlsystem einer Werkzeugmaschine in der Regel von einer Zentralpumpe versorgt. Durch einen Betrieb in Zweipunktregelung bewegt sich die Temperatur des Kühlfluids zwischen einer unteren und oberen Schranke. Das Gesamtsystem wird mit dem Einschalten der Hauptantriebe aktiv und operiert losgelöst von der eigentlichen Maschinennutzung. Die Folgen dieses trotz der zentralen Bedeutung vergleichsweise einfachen Betriebsmodus sind hohe elektrische Leistungsaufnahmen des Kühlsystems auf der einen Seite und weiterhin hohe thermo-elastisch induzierte Bauteilfehler auf der anderen Seite. Zur Adressierung dieser Problemstellung werden im industriellen Umfeld insbesondere im Falle kritischer Bearbeitungen lange Warmlaufphasen eingeplant, um die Maschinenstruktur in die Nähe eines thermisch stabilen Betriebsfensters zu bringen. Während dieser Warmlaufphasen findet kein Produktivbetrieb statt und obwohl eine Erwärmung der Struktur angestrebt wird, läuft das aktive Kühlsystem aufgrund des oben beschriebenen statischen Funktionsprinzips unter Volllast. Warmlaufphasen in dieser Form sind somit energieintensiv und produktivitätshemmend (vgl. Abbildung 6).

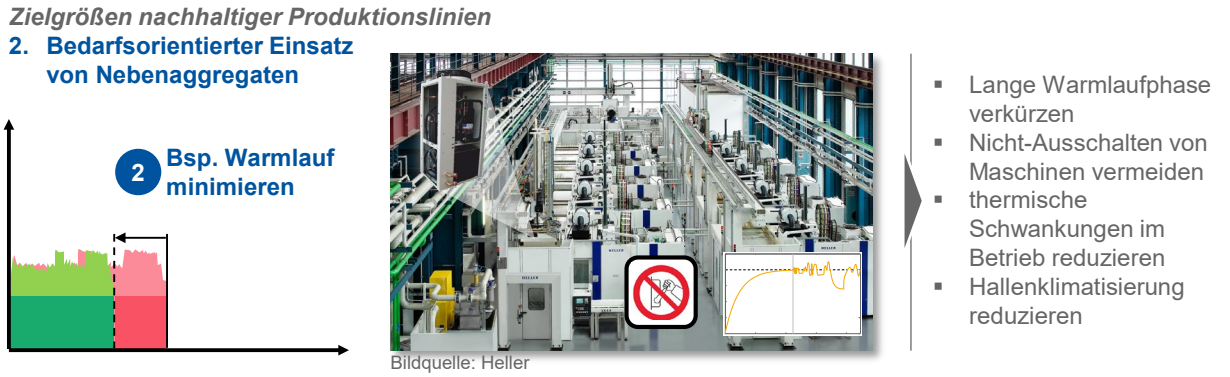


Abbildung 6: Bedarfsorientierter Einsatz von Nebenaggregaten als Zielgröße nachhaltiger Produktionslinien

Aus den genannten Missständen lassen sich für aktive Kühlsysteme zur Adressierung des Optimierungsproblems aus Produktivität, Qualität und Energieeinsatz folgende Ziele ableiten.

Ziel 1: Reduzierung von Warmlaufphasen durch gezieltes Erwärmen der Struktur (**Produktivität**)

Ziel 2: Steigerung der Bearbeitungsgenauigkeit durch Kompensation thermischer Schwankungen während der Betriebsphase (**Qualität**)

Ziel 3: Reduktion des Energieverbrauchs durch bedarfsgerechten Betrieb (**Energieeinsatz**)

Abbildung 7 zeigt die drei Ziele am Temperaturniveau und der elektrischen Leistungsaufnahme der Maschine.

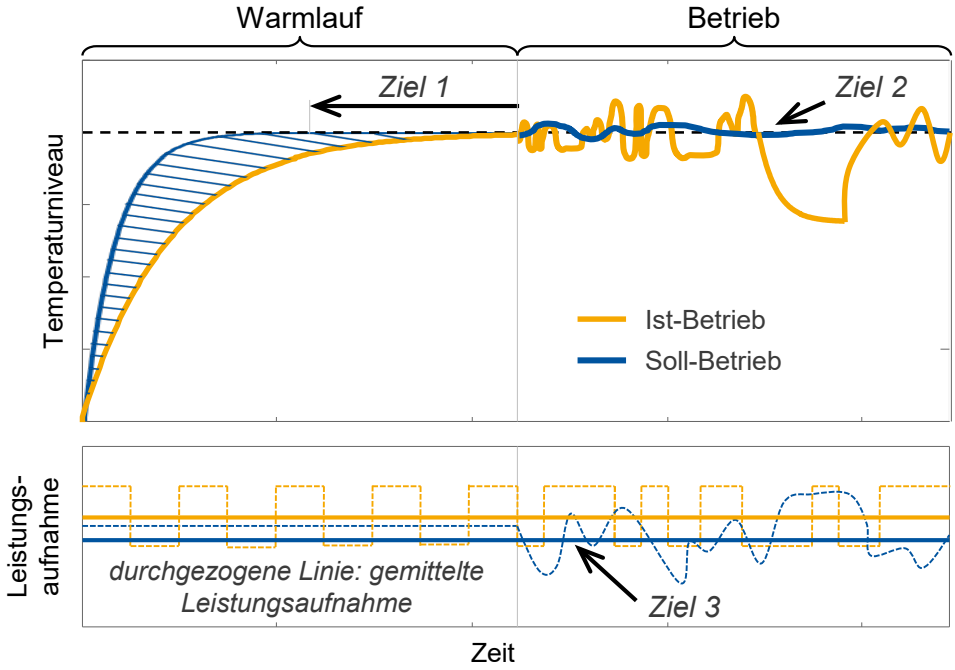


Abbildung 7: Zielgrößen bei der Optimierung der Betriebsphase aktiver Kühlsysteme

Bei der für die Erfüllung dieser Zielvorgaben erforderlichen Funktionalität, adaptiv und intelligent auf veränderte Randbedingungen reagieren zu können, handelt es sich um einen Grundgedanken aus der Regelungstechnik. Der mehrdimensionalen Zielsetzung folgend ergibt sich die Regelgröße aus mehreren Komponenten. Für die Ziele 1 und 2 kann die Strukturtemperatur einer Werkzeugmaschine als Repräsentant definiert werden. Eine aktiv geregelte Strukturtemperatur kann, in Kombination mit dem passenden Kühlaggregat, durch gezieltes Heizen einen schnellen Warmlauf ermöglichen. Darüber hinaus kann durch eine bedarfsgerechte, an der Strukturtemperatur der Werkzeugmaschine orientierte Kühlung während des Betriebs eine Stabilisierung des thermischen Zustands ermöglichen. Eine thermische Stabilität äußert sich dann in reduzierten thermo-elastischen Verlagerungen, was sich positiv auf die Bearbeitungsgenauigkeit auswirkt. Für Ziel 3 kann die elektrische Leistungsaufnahme als zu minimierende Regelgröße definiert werden, sodass sich insgesamt eine Mehrgrößenregelung mit zwei Regelgrößen ergibt. Auf der Stellgrößenseite sind die Kühlparameter zu nennen, wobei eine Werkzeugmaschine im Idealfall individuell ansteuerbare Kühlkreisläufe aufweist, damit neben einer zeitlichen

Anpassung an den tatsächlichen Bedarf auch eine räumliche Anpassung der Kühlleistung erfolgen kann.

Vor dem Hintergrund vergleichsweise hoher thermischer Zeitkonstanten bildet das Systemmodell einen weiteren wichtigen Baustein der Regelungsstrategie. Das Systemmodell liefert die Fähigkeit, zukünftige thermische Entwicklungen und die elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Betriebsparameter prognostizieren zu können. Sobald sich die Auswirkungen thermischer Effekte am Tool Center Point in Form einer unerwünschten Verlagerung äußern, ist ein schnelles Gegenregeln aufgrund der angesprochenen Zeitkonstanten praktisch nicht mehr möglich. Stattdessen müssen bereits Maßnahmen eingeleitet werden, bevor die eigentliche Wirkung in der Praxis zum Tragen kommt. Der dafür notwendige „Look-ahead“ geschieht mithilfe ebendieses Systemmodells, mit welchem sowohl die Strukturtemperatur als auch die elektrische Leistungsaufnahme als relevante Regelgrößen als Funktion thermischer Lasten und wirksamer Kühlparameter bestimmt werden können.

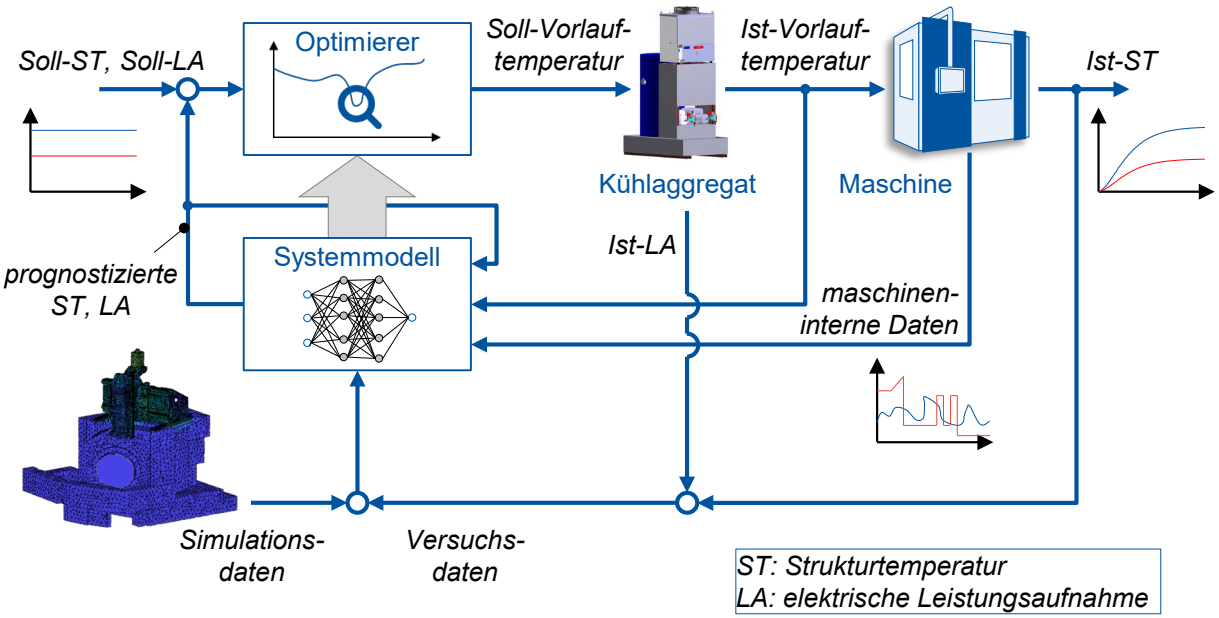


Abbildung 8: Struktur des modellprädiktiven Mehrgrößenreglers

Die sich so ergebende Architektur einer modellprädiktiven Mehrgrößenregelung (engl. model predictive control, MPC) ist in Abbildung 8 dargestellt und wird an einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum an dem Werkzeugmaschinenlabor WZL umgesetzt. Die Erfassung der aktuellen thermischen Lasten erfolgt über maschineninternen Daten wie der Spindeldrehzahl oder dem momentenbildenden Strom in elektrischen Antrieben. Das Systemmodell ist dann in der Lage, diese Daten in eine prognostizierte Ist-Strukturtemperatur und die elektrische Leistungsaufnahme des Kühlaggregats zu überführen. Bei dem Systemmodell handelt es sich um ein Künstliches Neuronales Netz (KNN), das a priori mithilfe von Simulations- und Versuchsdaten antrainiert wurde. Diese Datenkombination zur Bildung einer Trainingsbasis hat den Vorteil, dass große Datensätze vergleichsweise günstig generiert werden können. Insbesondere vor dem Hintergrund langer Versuchszeiten kann so ein guter Kompromiss zwischen Aufwand und Ertrag gefunden werden. Die mithilfe des Systemmodells prognostizierten Regelgrößen werden mit den Führungsgrößen abgeglichen. Die Regelabweichungen werden in einem Optimierer genutzt, um

neue Kühlparameter so zu definieren, dass die Summe der Regelabweichungen bei aktuell wirkenden Lastdaten minimiert wird.

Für die Umsetzung der durch die Regelung bestimmten Soll-Vorlauftemperaturen der Kühlkreisläufe als optimale Stellgrößen wird ein neu entwickeltes Kühlaggregat eingesetzt. Das Kühlaggregat ermöglicht die Ansteuerung eines jeden Kühlkreislaufs mit individuellen Kühlparametern. Aus einem Warm- und Kaltwassertank kann der geforderte Volumenstrom über einen ansteuerbaren Mischer so kombiniert werden, dass die jeweils gewünschte Vorlauftemperatur realisiert wird. Volumenstromgeregelte Kreiselpumpen (vgl. Abbildung 9) fördern das Kühlfluid durch die Kreisläufe. Da der Warmwassertank als Schichtspeicher (nicht dargestellt) ausgeführt ist, schichtet sich das rückfließende Wasser entsprechend dem hydrostatischen Auftrieb ein. Rückfließendes warmes Wasser aus elektrischen Antrieben kann somit für das Erwärmen von Strukturbauteilen im Rahmen von Warmlaufphasen genutzt werden, sodass eine maximale Energieeffizienz erreicht wird.

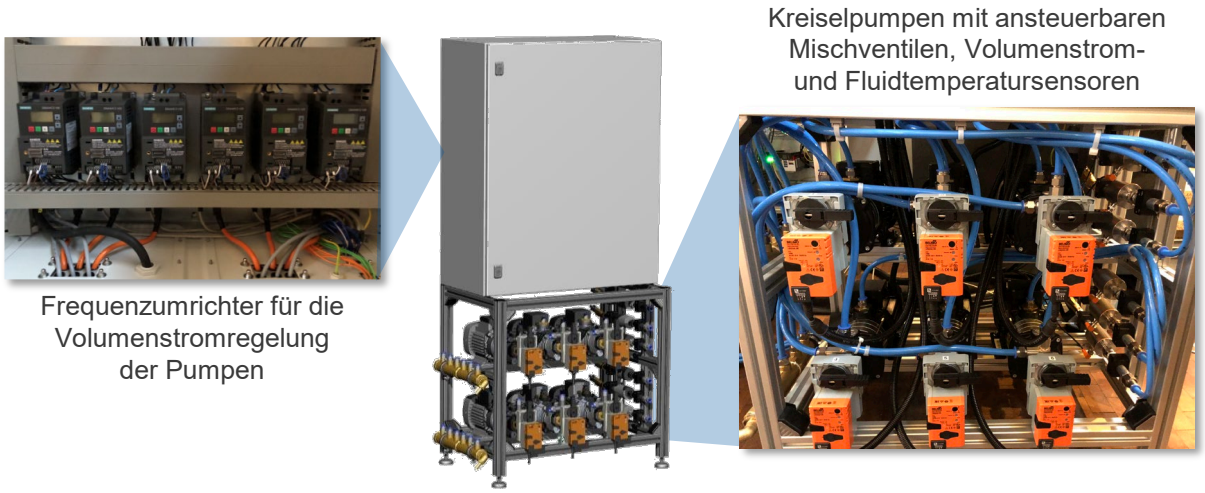


Abbildung 9: Darstellung des externen Kühlaggregats zur Versorgung der einzelnen Kühlkreisläufe

Der vorgestellte Ansatz für die modellprädiktive Regelung der aktiven Kühlsysteme konnte bereits an einer Hauptspindel erfolgreich implementiert und getestet werden. Abbildung 10 zeigt im oberen Bereich, dass im Rahmen eines Testlaufs eine stufenweise Steigerung der Drehzahl durchgeführt wurde. Mithilfe des Systemmodells eingebettet in den Optimierer wurde während der Betriebsphase eine Soll-Vorlauftemperatur für die Mantelkühlung ermittelt, mit deren Hilfe die Temperatur des Motors sowie des vorderen Festlagers als Regelgrößen konstant gehalten werden sollten. Es ist erkennbar, dass das Kühlaggregat die Vorgabe weitestgehend umsetzen kann, wobei im Verlauf der Ist-Vorlauftemperatur eine Schwankung auftritt. Aufgrund der thermischen Trägheit ist diese Schwankung in den Temperaturgängen nicht mehr enthalten (vgl. Abbildung 10 unten). Im unteren Diagramm sind neben den mithilfe der Reglung optimierten Verläufe auch die Verläufe bei konventioneller Kühlstrategie enthalten, die entsprechend der Drehzahlstufen sukzessive Anstiege enthalten. Durch die Implementierung der MPC konnten drei wesentliche Ergebnisse erzielt werden:

1. Innerhalb der ersten 500 Sekunden des Testlaufs findet ein deutlich beschleunigter Warmlauf auf ein höheres, thermisch günstigeres Temperaturniveau statt. Im oberen Diagramm ist dargestellt, dass dafür vergleichsweise warmes Wasser genutzt wird. In diesem Bereich heizt das aktive Kühlsystem die Struktur.

2. Während des Betriebs sorgt die Adaptivität des Kühlsystems für eine Homogenisierung, ausgedrückt durch deutlich konstantere Temperaturverläufe. Neben einer Reduzierung thermo-elastischer Verlagerungen können kritische Komponenten wie die Spindellagerung dadurch dauerhaft in einem effizienten und verschleißarmen Betriebspunkt operieren.
3. Im Bereich der letzten 750 Sekunden steht die Spindel still und simuliert damit eine Unterbrechung der Produktion. Bei konventioneller Kühlung sorgt dies für einen sofortigen Abfall der Temperatur. Im geregelten System kann dieser Effekt weitestgehend kompensiert werden, sodass nach Ende der Stillstandszeit mit gleichbleibender Qualität weitergefertigt werden kann.

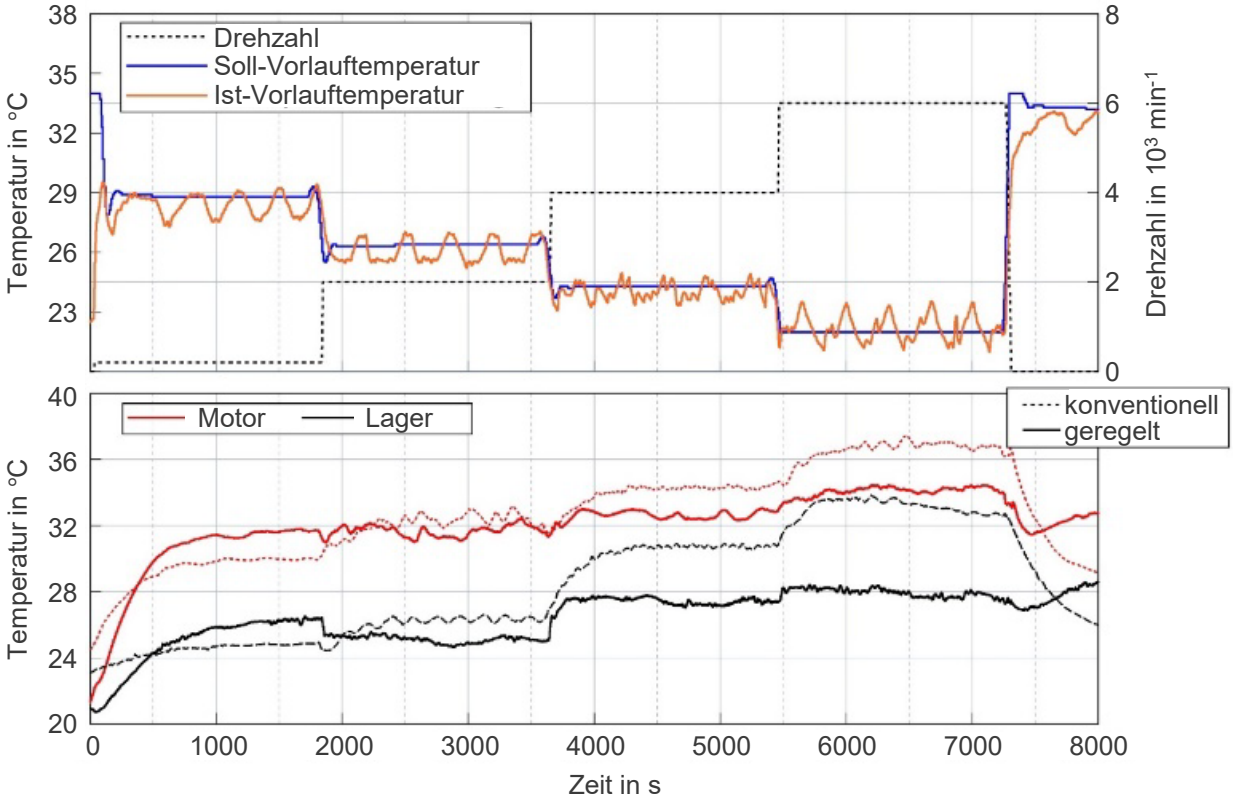


Abbildung 10: Beispielergebnisse an einer Motorspindel mit MPC

Am Beispiel der Hauptspindel konnte nachgewiesen werden, dass die intelligente Gestaltung des aktiven Kühlsystems nicht nur theoretische Potenziale aufweist, sondern mit dem vorgestellten Ansatz der modellprädiktiven Regelung praktisch umsetzbar ist. Im nächsten Schritt finden der Transfer auf die Gesamtmaschine und die Einbettung der Leistungsaufnahme in die Regelungsstrategie statt.

Darüber hinaus sind aktive Kühlsysteme lediglich ein Vertreter energieintensiver Nebenaggregate. Auch im Falle des Einsatzes von Kühlschmierstoff (KSS) ist denkbar, eine gesamtheitliche Bewertung des KSS-Einflusses (Verschleiß, Prozesskraft/Verlagerung, elektrische Leistungsaufnahme) im Kontext einer modellprädiktiven Regelung zu berücksichtigen, um den Betrieb vor nachhaltigen Bewertungskriterien zu optimieren.

4 Minimierung der Prozesszeit

Eine weitere Möglichkeit den Ressourceneinsatz einer Produktion zu reduzieren, ist die Minimierung der Prozesszeit. Dass produktivitätssteigernde Maßnahmen in mehreren Dimensionen zu einer nachhaltigeren Gestaltung der Produktion beitragen können, zeigt die folgende Betrachtung.

1. Minimierung des Grundlastanteils
   Eine Maximierung der Produktivität in der Zerspanung verändert die elektrische Leistungsaufnahme pro gefertigtem Bauteil. In eigenen Untersuchungen [16] konnte gezeigt werden, dass eine Minimierung der Prozesszeit Hand in Hand geht mit einer Minimierung des Stromverbrauchs pro Fertigteil. Aufgrund des hohen Grundlastanteils (vgl. Kapitel 2) dominiert die Prozesszeitminimierung mit den damit verbundenen Grundlasteinsparungen deutlich die höheren Verbräuche der elektrischen Antriebe infolge der Produktivitätssteigerung.
2. Ressourceneffizienz Werkzeugmaschine
   Je produktiver Anlagen betrieben werden können, desto weniger Anlagen sind für die Herstellung der angestrebten Menge bzw. Anzahl an Werkstücken notwendig.
3. Reduktion der Fertigungskosten
   In Analogie zur elektrischen Leistungsaufnahme sorgt eine höhere Produktivität für eine Verteilung der Fertigungsfixkosten, beispielsweise für Personal und sonstige Betriebsmittel, auf eine größere Anzahl an Bauteilen.

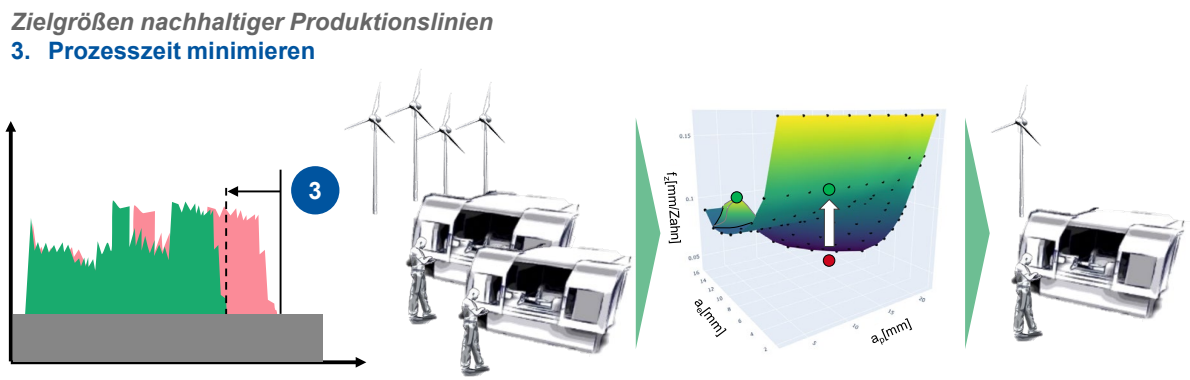


Abbildung 11: Prozesszeitminimierung als Zielgröße als Zielgröße nachhaltiger Produktionslinien

Diese drei Bespiele legen nahe, dass produktive Fertigungsprozesse mit kurzen Prozesszeiten anzustreben sind. Als Maß für die Produktivität lässt sich das Zeitspanvolumens Q verwenden. Dieses ergibt sich aus dem Produkt der Schnittbreite a_e, der Schnitttiefe a_p, der Drehzahl n und des Vorschubs pro Umdrehung f.

$$Q = a_e \cdot a_p \cdot n \cdot f$$

Um eine möglichst hohe Produktivität zu erreichen, müssen die einzelnen Einflussgrößen optimiert werden, sodass das Zeitspanvolumen maximiert wird. Hierbei ergeben sich unterschiedliche Limitierungen durch das statische und dynamische Nachgiebigkeitsverhalten sowie die Leistung der Werkzeugmaschine [23]. Damit eine Minimierung der Prozesszeit vor dem Hintergrund der oben aufgeführten drei Aspekte tatsächlich zu einer Steigerung der Nachhaltigkeit führt, muss sichergestellt werden, dass die positiven Auswirkungen mögliche negative Auswirkungen überwiegen. Wie bei einem optimierten Betrieb von Nebenaggregaten (vgl. Kapitel 3) entsteht eine mehrdimensionale Optimierungsaufgabe, deren Lösung nur modell- oder wissensbasiert wirkungsvoll erreicht werden kann.

Im Zuge der CAM-Planung werden im NC-Programm die einzelnen Prozessgrößen für das Zeitspanvolumen definiert. Hierbei folgt der Prozessplaner in der Regel einem individuellen Regelwerk, das einerseits auf seinem Expertenwissen sowie andererseits auf Empfehlungen z. B. seitens des Werkzeugherstellers beruht. Beim Einfahren eines Prozesses (Ramp-up) werden die gewählten Prozessparameter darüber hinaus durch einen Maschinenbediener hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit überprüft und optimiert. So sind insbesondere erfahrene Maschinebediener in der Lage, instabile Prozessbereiche akustisch zu erkennen und diese durch Variation der Drehzahl und des Vorschubs zu stabilisieren.

Die initiale Auswahl der Prozessparameter kann dazu führen, dass Prozesse zwar die erforderliche Fertigungsqualität erfüllen, allerdings nicht das volle technische Potential von Maschine und Werkzeug ausnutzen. Die zunehmende Datenverfügbarkeit und steigende Rechenkapazitäten bieten in Kombination mit Experten- und Modellwissen die Möglichkeit, versteckte Potentiale zu erschließen und die Produktivität zu steigern. Damit dies in der industriellen Anwendung realisiert werden kann, dürfen die Lösungen die Wettbewerbsfähigkeit des jeweiligen Unternehmens nicht negativ beeinflussen. Dies bedeutet zum einen, dass der Fertigungsbetrieb nicht behindert werden darf. Zum anderen muss der Investitionsaufwand möglichst gering sein. In der Praxis dürfen demnach keine Änderungen am Maschinenpark und keine invasiven Eingriffe an den einzelnen Maschinen stattfinden. Zugleich sollten nur minimale Anpassung am Fertigungsprozess, bspw. Vorschub oder Drehzahländerungen, vorgenommen werden, sodass möglichst wenig Folgeänderungen auftreten. Die historienbasierte Analyse von Produktionsdaten bietet unter der Verwendung von Modell- und Expertenwissen enormes Potenzial, all dies zu ermöglichen und Prozesse so zu optimieren, dass ihre Prozesszeit und in der Folge auch ihr Ressourcenverbrauch reduziert wird.

In diesem Kapitel werden zwei konkrete Anwendungsfälle vorgestellt, in denen daten- und wissensbasiert Prozesskarten für ideale Prozessparameter erzeugt werden. Zunächst wird ein Ansatz zur Generierung und Nutzung von Expertenwissen präsentiert und am Beispiel von werkzeugspezifischen Schnittdaten erläutert. Anschließend wird ein industriell anwendbares, onlinefähiges Frühwarnsystem vor Prozessinstabilitäten aufgrund von regenerativen Ratterschwingungen vorgestellt. Die Bewertungsgrundlage stellen prozessparallel aufgezeichnete Daten dar.

4.1 Wissensbasierte Prozessoptimierung

Die oben genannten Beispiele verdeutlichen, dass menschliche Experten die Prozessplanung und -entwicklung stark beeinflussen. Insbesondere im Zuge des Ramp-ups liefert ein Experte eine umfassende Bewertung des Bearbeitungsprozesses auf Basis seines Erfahrungswissens. Durch die direkte Interaktion mit der Maschine kann er Sinneseindrücke, wie z. B. das Wahrnehmen von Schwingungen oder das Erkennen von verglühenden Spänen, unmittelbar zur lokal differenzierten Evaluation des Fertigungsprozesses nutzen. Erfahrene Maschinenbediener können im Anschluss unter Rückgriff auf ihr Erfahrungswissen unmittelbare Optimierungen, wie z. B. die Anpassung des Vorschubs, einleiten. Diese sind nicht nur auf die Prozessstabilität beschränkt, sondern können sich insbesondere auch auf die Produktivität des Prozesses oder die erzielte Bauteilqualität beziehen.

Derzeit sind die für den Experten entscheidungsrelevanten Informationen nicht umfänglich digital erfasst, sodass produktionstechnische Zusammenhänge rein datenbasiert bislang weder systemisch noch durch lernende Systeme abgebildet werden können. Zentrale Herausforderungen liegen daher darin, das Expertenwissen zu digitalisieren, zu ob-

jektivieren und schließlich auf unbekannte Anwendungsfälle kontextsensitiv zu übertragen. So werden produzierende Unternehmen in die Lage versetzt, das heterogene Erfahrungswissen ihrer Mitarbeiter zu konservieren und unternehmensweit verfügbar zu machen. Dies ist im Angesicht des demografischen Wandels und damit einhergehenden Fachkräftemangels von entscheidender Bedeutung.

Das Expertenwissen kann in drei unterschiedliche Komplexitätslevel unterteilt werden:

- Explizites Expertenwissen

  Dieses Wissen lässt sich regelbasiert abbilden. Die zugrundeliegenden Zusammenhänge sind entweder bereits erfasst (z. B. Formel, Tabellenbuch) oder der Experte hat sie insofern verinnerlicht, dass er sie begründen und vor allem selbstständig formalisieren kann (z. B. Technologieparameter bei spezifischer Werkstoff-Schneidstoff-Kombination).

- Formalisierbares implizites Expertenwissen

  Dieses Wissen lässt sich nur unter Zuhilfenahme datengetriebener Algorithmen regelbasiert abbilden. Der Experte benötigt tiefgreifende Informationen über den Prozess und den aktuellen Zustand der Produktionsmittel, um seine subjektive Einschätzung (z. B. „Prozess ist zu laut“) im Rahmen einer objektiven Regel (z. B. Reduktion des Vorschubs bei Überschreiten eines kritischen Beschleunigungswerts) formalisieren zu können.

- Nicht formalisierbares implizites Expertenwissen

  Dieses Wissen kann durch einen menschlichen Experten nicht formalisiert werden. Obwohl keine objektiven oder subjektiven Indikatoren auf Optimierungsmöglichkeiten des Prozesses hinweisen, nimmt der Experte Veränderungen am Prozess vor (z. B. Anfahrtsstrategie A „besser“ als B).

Insbesondere die Nutzung des nicht formalisierbaren impliziten Wissens stellt eine Herausforderung dar. Dieses Expertenwissen hat gleichzeitig den höchsten Wert für produzierende Unternehmen, weshalb es zur Produktivitätssteigerung zwingend erfasst werden muss. Die Möglichkeit zur Erfassung des Expertenwissens bietet sich immer dann an, wenn der Experte in den Prozess eingreift. Im Rahmen des Ramp-ups geschieht dies sogar iterativ, sodass diese Phase eine ideale Umgebung für die Digitalisierung von menschlichem Expertenwissen darstellt. In der industriellen Praxis werden Prozessbewertungen und vorgenommene Optimierungen seitens des Maschinenbedieners nur selten lückenlos zurückgemeldet und berücksichtigt. Dieses Feedback ist jedoch essentiell für die Abbildung des menschlichen Wissens. Gleichzeitig müssen dem Experten zur Herstellung übergreifender Transparenz und einem damit einhergehenden verbesserten Prozessverständnis aussagekräftige Daten über den Prozess direkt an der Maschine zur Verfügung gestellt werden.

Diese beiden Aspekte motivieren das in Abbildung 12 dargestellte Konzept zur wissensbasierten Prozessoptimierung. Moderne Werkzeugmaschinen besitzen zahlreiche Sensoren, die zur Steuerung und Regelung verwendet werden. Klassische Beispiele hierfür sind Strom- und Positionssensoren. Diese Daten können über die Steuerung ausgelesen und zur Erzeugung eines digitalen Schattens genutzt werden [7]. Entscheidend ist hierbei die Kontextualisierung der Rohdaten, da das Expertenwissen den produktionstechnischen Randbedingungen sonst nicht zugeordnet werden kann. Zugleich werden die Rohdaten bei der Generierung des digitalen Schattens auch veredelt (bspw. Berechnung der Werkzeugverlagerung aus den Prozesskräften) und mit zusätzlichen Kennwerten (z. B.

Werkzeugverschleißzustand) angereichert. Dies unterstützt einerseits die Übertragbarkeit der Daten und ermöglicht es andererseits, für den Experten nachvollziehbare Kennwerte direkt an der Maschine zu visualisieren. Durch die Visualisierung der Roh- und Modelldaten an der Maschine können dem Experten datenbasierte Einblicke in den Prozess gewährt werden, die zur Optimierung der Produktivität notwendig sind (vgl. Abbildung 12 – Pfad 1).

Darüber hinaus kann ein erfahrener Maschinenbediener einzelne Prozessabschnitte bewerten. Hierzu steht ihm eine programmierbare Tastatur zur Verfügung, mit deren Hilfe nicht nur vordefinierte Label, sondern auch textuelle Optimierungsvorschläge hinterlegt werden können, die mitsamt den Rohdaten gespeichert werden. Werden diese gelabelten Daten nun einer künstlichen Intelligenz (KI) zugeführt, so kann dieses einen Zusammenhang zwischen den anfallenden Daten und den Labeln im Rahmen einer Trainingsphase erlernen. In zukünftigen Prozessen mit hinreichend ähnlichen Prozesssituationen kann das System einem unerfahreneren Maschinenbediener Handlungsempfehlungen und Hinweise auf Basis des kontextsensitiv erlernten Expertenwissens unterbreiten (vgl. Abbildung 12 – Pfad 2). Der Anwender kann die unterbreiteten Vorschläge annehmen oder ablehnen, wodurch kontinuierliches Lernen ermöglicht wird. Das menschliche Erfahrungswissen zur Prozessoptimierung wird so graduell digitalisiert.

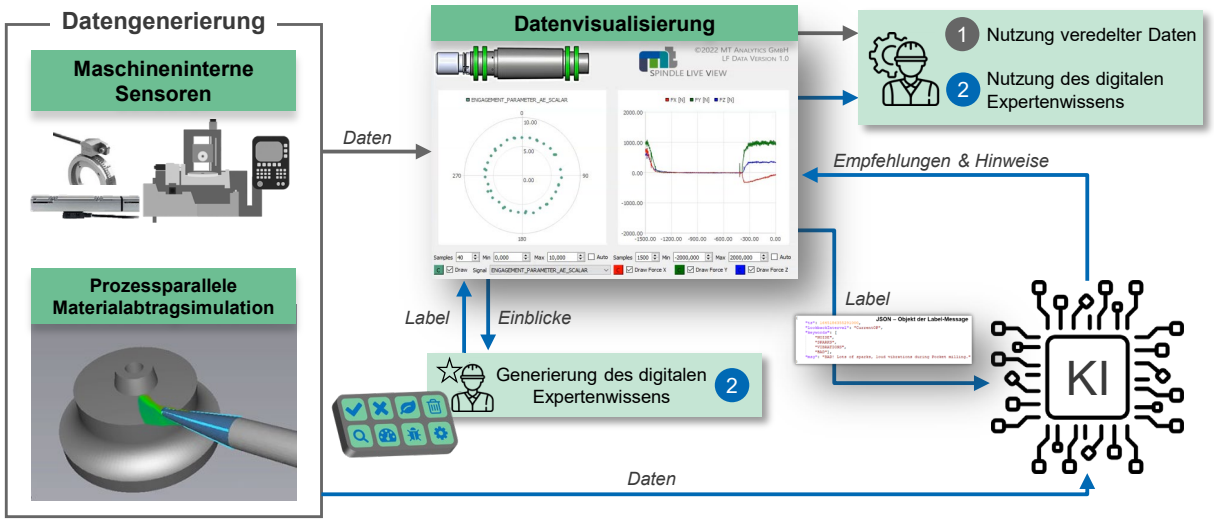


Abbildung 12: Datengetriebenes Lernen von menschlichem Expertenwissen

Anhand eines Fräsprozesses lässt sich dieses Konzept konkretisieren. Für die einzelnen Faktoren des Zeitspanvolumens lassen sich multidimensionale Prozessparameter-Karten generieren. Diese ermöglichen es zunächst, den aktuell bekannten Optimal-Zustand des Prozesses für ein Werkzeug hinsichtlich seiner Parameter wie Schnittbreite und -tiefe sowie Vorschub pro Zahn oder Schnittgeschwindigkeit darzustellen. Eine erste Grundlage hierfür können Daten von Werkzeugherstellern oder aber unternehmensinterne Standards sein. Die Daten können im Rahmen der Prozessplanung eine Orientierungshilfe für die initiale Auslegung eines Fertigungsprozesses sein. Gleichzeitig können die Optimal-Werte auch gemäß Abbildung 12 unmittelbar an der Maschine angezeigt und mit den aktuellen Ist-Werten prozessparallel verglichen werden. Zur Ermittlung der Ist-Werte werden die Schnittdaten wie bspw. der Vorschub pro Zahn auf Basis der maschineninternen Daten bestimmt und mithilfe einer Materialabtragsimulation in einen gemeinsamen Kontext hinsichtlich der Schnittbreite und -tiefe gebracht. Der Maschinenbediener erhält so unmittelbar eine Rückmeldung dazu, ob das gerade eingesetzte Werkzeug überlastet

wird oder ob sogar eine erhöhte Produktivität durch z. B. einen höheren Zahnvorschub erzielt werden kann (vgl. Abbildung 13 – Punkt 1). Eine unmittelbare Optimierung des Vorschubs ist dann bspw. über das Vorschubpotentiometer möglich.

Der Maschinenbediener kann im laufenden Prozess dennoch von den bekannten Optimal-Werten abweichen. Dies ist bspw. dann der Fall, wenn er Optimierungspotenzial beim Werkzeugeinsatz erkennt oder die gesetzten Werte als unangemessen hoch empfindet. In diesen Fällen werden prozessparallele Label zum Werkzeugeinsatz vergeben, auf deren Grundlage die bekannten Optimal-Werte angepasst werden und die Prozessparameter-Karte entsprechend aktualisiert wird (vgl. Abbildung 13 – Punkt 2). Punktuell bildet die Karte auf diese Weise das menschliche Expertenwissen ab und stellt es anderen Maschinenbedienern zur Verfügung. Durch eine Nutzung des neugenerierten Wissens lassen sich so Fertigungsprozesse kontinuierlich optimieren. Das Vorgehen lässt sich auf anderen Anwendungsbereiche, wie z. B. die kontextspezifische Bewertung des Spindelzustands, übertragen.

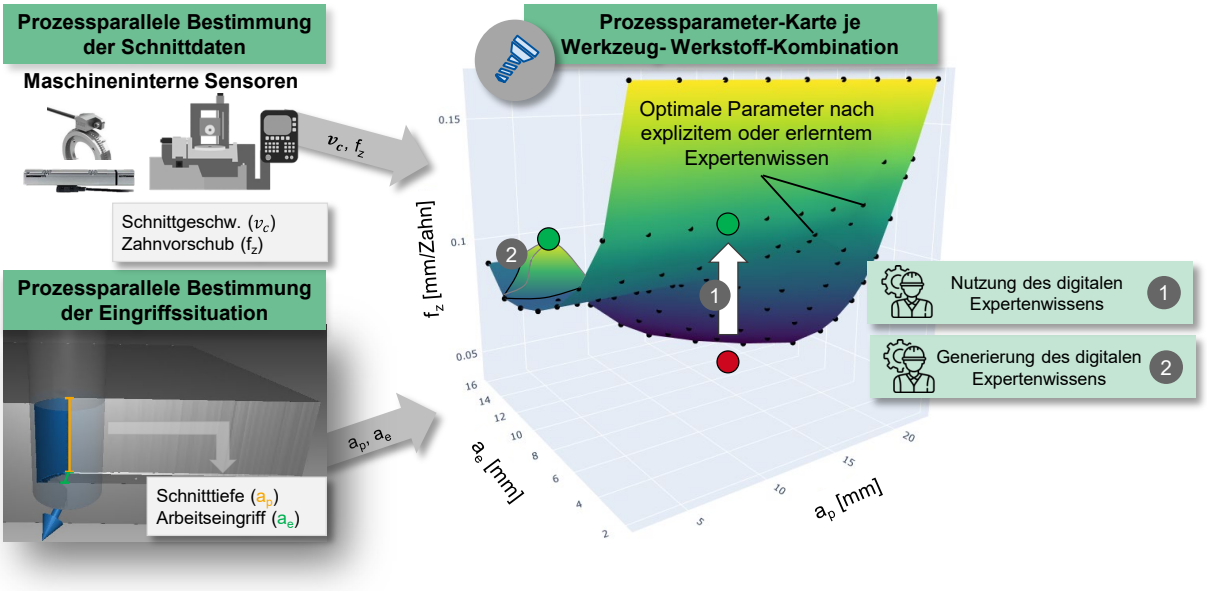


Abbildung 13: Prozessparameter-Karten zur Steigerung der Produktivität

4.2 Modellbasierte Prozessoptimierung

Neben einem wissensbasierten Ansatz ist es auch modellbasiert möglich, eine nachhaltige Prozesszeitoptimierung zu erzielen. Wie zu Beginn des Kapitels aufgezeigt, führt der zentrale Zielkonflikt aus Produktivität und Bauteilqualität häufig zu einer konservativen Prozessplanung. Insbesondere das Auftreten von selbsterregten und sich regenerativ selbstverstärkenden Schwingungen (Rattern), limitiert die Produktivität. Um das volle Potential einer Werkzeugmaschine auszuschöpfen, wird ein System zur Rattervermeidung benötigt, welches hohe Produktivität bei gleichzeitiger Gewährleistung der Bauteilqualität sicherstellt.

Ein Lösungsansatz liegt in der gezielten Vermeidung von Prozessinstabilitäten durch eine geeignete Wahl der Bearbeitungsparameter für den Prozess. Für die optimale Wahl der Prozessparameter stellen so genannte Stabilitätskarten, die Stabilitätsgrenzen in Abhängigkeit von Schnitttiefe und Drehzahl darstellen, ein wichtiges Hilfsmittel dar [24].

Die Effizienz experimentell ermittelter Stabilitätskarten wurde in den letzten Jahren zwar gesteigert [25], ist für eine Anwendung in der Kleinserienfertigung dennoch zu aufwändig

und nicht wirtschaftlich, da für jede Kombination aus Werkzeug, Werkstück und Maschine eine neue Stabilitätskarte in Vorversuchen experimentell ermittelt werden muss. Mit dem Trend einer nachhaltigen und ressourceneffizienten Produktion ist dies nicht vereinbar.

Alternativ können Ratterschwingungen und die damit verbundenen Stabilitätsgrenzen modellbasiert ermittelt werden. Die simulative Ermittlung von Stabilitätsgrenzen erfolgt auf Basis eines analytischen Modells, welches die Wechselwirkung zwischen Maschine und Prozess beschreibt. Es existieren zahlreiche Simulationsansätze und Methoden [26]–[28], doch bis heute existiert kein Vorgehen, welches die modellbasierte Bestimmung von Stabilitätsgrenzen prozessparallel nutzbar macht. In diesem Beitrag wird ein neues Konzept zur modellbasierten online Identifikation und Frühwarnung vor Prozessinstabilitäten für einen Fräsprozess vorgestellt.

Das Frühwarnsystem liefert ein Werkzeug, um den vorliegenden Zielkonflikt zwischen Produktivität und Bauteilqualität, insbesondere in der Kleinserien- und Einzelteilfertigung, zu lösen. Die prozessparallele Überprüfung der Stabilitätsgrenze unterstützt dabei insbesondere „First-Part-Right“ Ansätze zur Fertigung aufwändiger und teurer Einzelteile oder Kleinserien in einem ressourcenschonenden Ansatz.

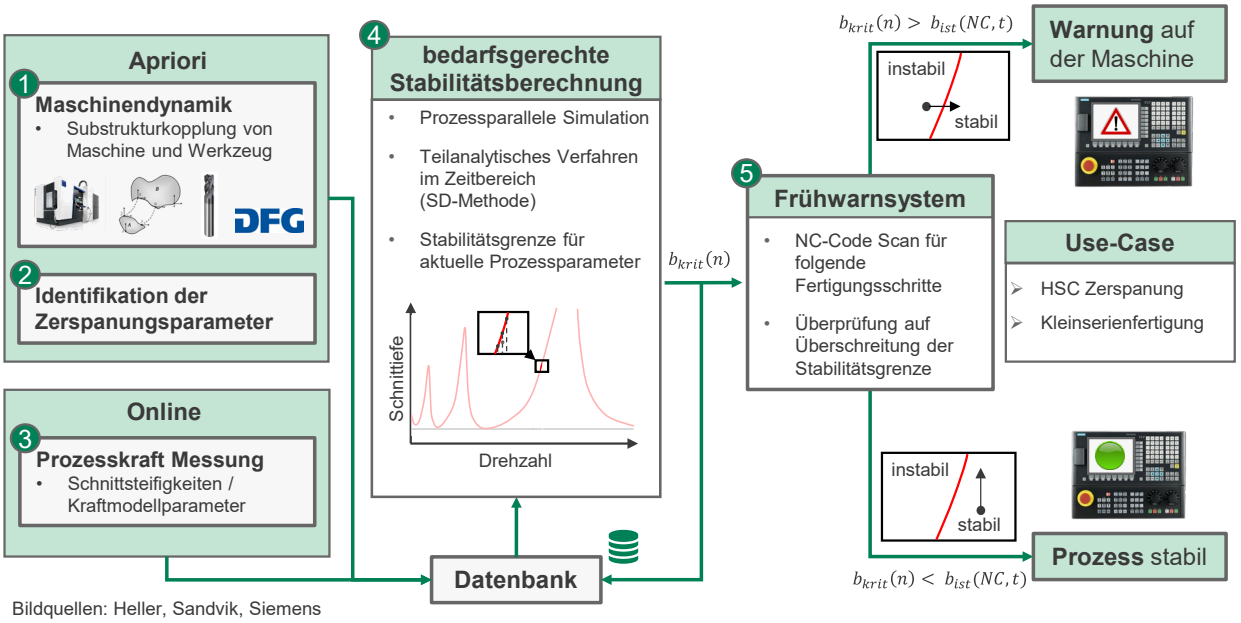


Abbildung 14: Methodik des Ratter-Frühwarnsystems

Die Methodik des Ratter-Frühwarnsystems ist in Abbildung 14 dargestellt und umfasst fünf zentrale Bausteine:

1. Für die modellbasierte Simulation liegt die zentrale Problematik in einer effizienten Abbildung der veränderlichen Dynamik des Maschine-Werkzeug-Werkstoff-Systems. Diese wird durch neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Substrukturkopplung gelöst [29]. Ein einmalig eingemessenes Modell der Werkzeugmaschine wird mit analytischen Werkzeugmodellen gekoppelt, um die experimentellen Messaufwände auf ein Minimum zu reduzieren.
2. Mit einer Durchdringungssimulation auf Basis eines 3-D Modells des Rohteils und dem NC-Code können a priori die Zerspanungsparameter identifiziert werden. Hieraus können die für die Stabilitätssimulation erforderlichen Prozessgrößen wie bspw. die Schnitttiefe und -breite bezogen auf die unterschiedlichen Bearbeitungs-

schritte extrahiert werden. Es erfolgt eine Segmentierung des Bearbeitungsprozesses anhand unterschiedlicher Werkzeuge und programmierter Prozessparameter. Anhand dieser Datengrundlage können die jeweils kritischsten Bearbeitungsparameter für unterschiedliche Segmente des Prozesses identifiziert werden.

3. Neben der Maschinendynamik ist die Kenntnis der Schnittsteifigkeiten erforderlich. Aufgrund der großen Fortschritte im Bereich der echtzeitfähigen Erfassung von Prozesskräften, bspw. durch spindelintegrierte Sensorik [25], können die Schnittsteifigkeiten prozessparallel parametriert werden. Dies erfolgt auf Basis eines Vergleichs von gemessener und simulierter Prozesskraft mit einem Ensemble Kalman Filter, welcher bereits für die Anwendung einer kontinuierlichen Parameteridentifikation analytischer Kraftmodelle im Fräsprozess etabliert wurde [30]. Durch eine prozessparallele Identifikation der Schnittsteifigkeiten können die für die Stabilitätssimulation erforderlichen Eingangsgrößen anhand der reellen Randbedingungen des laufenden Prozesses ermittelt werden. Dies bietet einen Vorteil gegenüber konventionellen modellbasierten Ansätzen, die die Stabilitätsgrenze a priori simulieren und deren Datengrundlage sich auf Vorversuche oder tabellierte Werte stützt.
4. Die Stabilitätsgrenzen werden prozessparallel innerhalb einer bedarfsgerechten Simulation ermittelt, die auf Basis der aktuellen Prozessparameter eine Aussage auf der Maschinensteuerung bereitstellt, ob der laufende Prozess stabil bzw. instabil ist. Bedarfsgerecht bedeutet, dass nur die aktuell relevanten Drehzahlen und Schnitttiefen des laufenden Bearbeitungsschrittes für die Stabilitätssimulation ausgewertet werden. Anders als bei konventionellen modellbasierten Ansätzen zur Stabilitätssimulation wird daher nicht die gesamte Stabilitätskarte, sondern nur ein Bereich um den aktuell relevanten Arbeitspunkt berechnet. Mit diesem Ansatz können die für den prozessparallelen Ansatz erforderlichen schnellen Rechenzeiten gewährleistet werden.
5. Auf Basis der berechneten Stabilitätsgrenze können zukünftige Bearbeitungsschritte in einer Art „Look-ahead Funktion“ auf eine Überschreitung der Grenze geprüft werden. Das Frühwarnsystem stellt eine online Funktionalität bereit, die während einer Bearbeitung vor potentiellen Prozessinstabilitäten im weiteren Bearbeitungsverlauf warnt. Anhand der Warnung kann das Auftreten von Prozessinstabilitäten durch einen Eingriff des Bedieners verhindert werden.

Durch den Einsatz eines Datenbanksystems können identifizierte Stabilitätsgrenzen spezifischer Paarungen aus Werkzeugmaschine, Werkzeug und Werkstoff gespeichert und für eine nachgeschaltete Prozessoptimierung oder zukünftige Prozessauslegungen genutzt werden.

5 Verlängerung der Nutzungsphase

Die Verlängerung der Nutzungsphase einer Maschine und ihrer einzelnen Komponenten stellt einen weiteren Ansatz zur Gestaltung von *Nachhaltigkeit in Produktionslinien* dar (vgl. Abbildung 15). Hierfür ist zunächst die Kenntnis über den geplanten Prozess, damit einhergehende und zu erwartende Belastungen sowie das Verschleißverhalten der entsprechenden Komponente notwendig. In der Werkzeugmaschinenbranche existiert hierzu aktuell ein signifikantes, über viele Jahre hinweg aufgebautes daten- und modellbasiertes Wissen. Simulierte Daten können hierbei Einsatz finden, um ein präziseres di-

gitales Abbild des Verschleißzustands zu ermitteln. Dabei können diese simulierten Daten sowohl eine bestehende reale Datengrundlage ergänzen als auch eine bisher nicht vorhandene Datenbasis bilden, um die Zustandsentwicklung bei verschiedenen Belastungskollektiven präziser vorherzusagen. Auf dieser Grundlage können Prozesse und die mit den geplanten Prozessen einhergehenden Belastungen vorab so gestaltet werden, dass beispielsweise eine vergleichbare Produktivität bei erheblich verlängerter Lebensdauer der Komponenten wie der Kugelgewindetriebe (KGT) oder Spindellager erzielt wird, womit ein Beitrag zur Steigerung der Nachhaltigkeit in der industriellen Produktion geleistet wird. Des Weiteren liefert eine zuverlässigere Prädiktion der technischen Lebensdauer eine planbare Instandhaltung oder Wiederaufbereitung von Systemen und Komponenten ganz im Sinne der Kreislaufwirtschaft.

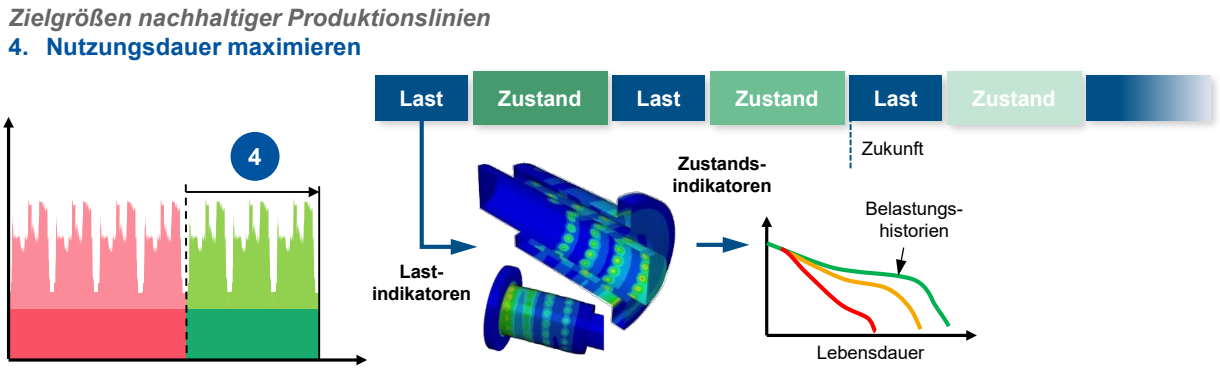


Abbildung 15: Maximierung der Nutzungsdauer als Zielgröße nachhaltiger Produktionslinien

5.1 Identifikation von gebrauchsdauerreduzierenden Betriebszuständen

Im Hinblick auf die Werkzeugmaschine stellt die Hauptspindel eine essentielle Systemkomponente dar. Zur Lagerung der Spindelwelle werden in den meisten Fällen hochpräzise Schrägkugellager verwendet. Diese sind in der Anwendung hohen Drehzahlen und Belastungen ausgesetzt, welche eine allumfassende Auslegung der Komponente notwendig machen. Hierbei werden neben der theoretischen Lebensdauer und den maximalen Pressungen insbesondere kinematische Auslegungsgrößen wie das Bohr-Roll-Verhältnis oder der Kugelvor- und -nachlauf betrachtet. Letzterer beschreibt ein Vor- oder Nachlaufen der einzelnen Kugeln innerhalb der Käfigtaschen in Drehrichtung. Die Ursache für die Ausbildung eines bestimmten Kugelvor- und -nachlaufs liegt in der Art der Lagerbelastung. Treten neben der axialen Vorspannung durch die Prozesslasten Radialkräfte oder Momentbelastungen auf, entsteht eine Druckwinkeländerung am inneren und äußeren Kontakt entlang des Lagerumfangs [31]. Dies hat die Modulation einer Orbitalgeschwindigkeit um die Lagerachse zur Folge, welche letztendlich zum besagten Kugelvor- und -nachlauf führt. Sofern der geometrisch mögliche Bewegungsfreiraum der Kugeln überschritten wird, können signifikante Kontaktkräfte zwischen dem Käfig und den Kugeln auftreten und durch erhöhte Reibung sowie Verschleiß zum Lagerausfall führen. Dementsprechend stellt dieser Wert neben den maximalen Pressungen und dem Bohr-Roll-Verhältnis eine zentrale Auslegungsgröße von Spindellagern dar [23].

Da die Kugelbewegung vom lastabhängigen Reibungszustand in den Wälzkontakten beeinflusst wird, ist eine exakte Beschreibung mit kinematischen Formeln schwierig. Folgend ergeben sich beim Einfluss von prozessähnlichen Belastungen mit gängigen Berechnungsansätzen Abweichungen zwischen der berechneten und der tatsächlichen Kugelkinematik [32]. Daraus leitet sich die Motivation ab, die Kugelbewegung im Betrieb

unter statischen und dynamischen Belastungen messtechnisch zu erfassen, um zum einen vorhandene Berechnungsansätze zu optimieren und somit zuverlässiger zu machen und zum anderen für die Lagerkinematik ungünstige Belastungszustände bei der Bearbeitung zu identifizieren und so die Nutzungsdauer von Spindellagern zu verlängern. Diesem Vorhaben widmen sich aktuelle Forschungsarbeiten am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen (WZL), im Rahmen welcher ein Spindellagerprüfstand (Abbildung 16) entwickelt wurde, der es erlaubt, definierte statische und dynamische Lagerlasten zu generieren, diese mittels der resultierenden Wellenverlagerung zu bestimmen sowie die sich einstellende Kugelbewegung messtechnisch zu erfassen.

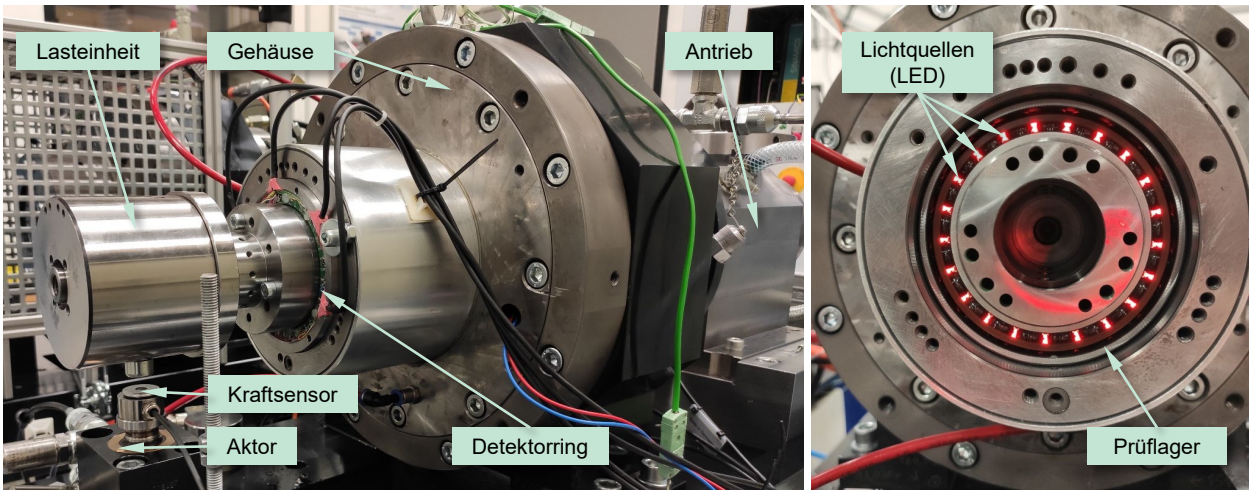


Abbildung 16: Hochgeschwindigkeitslagerprüfstand zur Messung des Kugelvor- und -nachlaufs

Hierfür wurde wie in Abbildung 17 dargestellt zunächst ein optisches Messsystem zur Erfassung der Kugelposition entwickelt. Das System nutzt Lichtquellen, die das Spindellager zwischen dem Innenring und dem Käfig durchleuchten. Gegenüberliegende Fotodetektoren erfassen das Lichtsignal, welches von den Kugeln intermittierend abgeschattet wird. Um die Bewegung einer jeden einzelnen Kugel zu bestimmen, befinden sich insgesamt mehrere dieser Lichtschranken über den Lagerumfang verteilt. Eine Abtastrate von 40 MHz ermöglicht nach der Auswertung der Sensordaten eine Auflösung zur Kugeldetektion an den Sensorpositionen von unter 2 µm. [32]

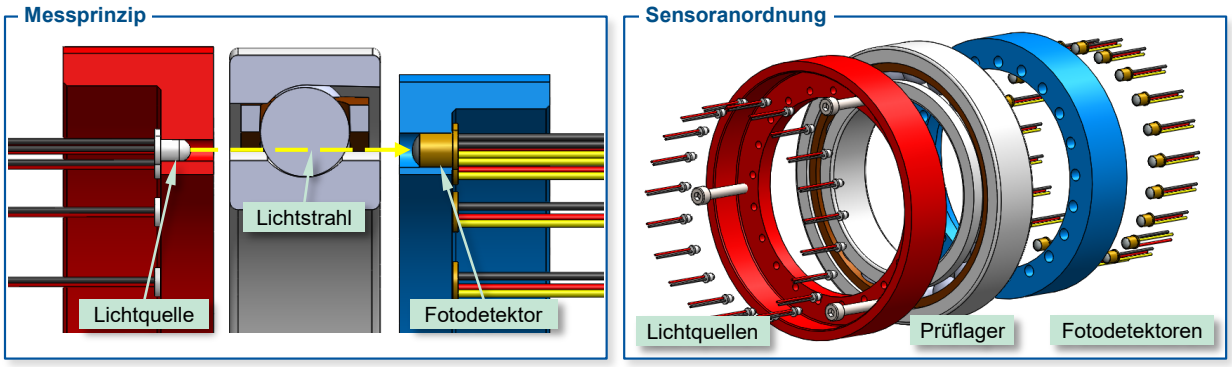


Abbildung 17: Optisches Messsystem zur Erfassung der Kugelposition in einem Spindellager

Zeitsynchron wird des Weiteren die Wellenverlagerung vor dem Prüflager mittels je drei radial und axial angeordneten Wirbelstromsensoren erfasst. Hieraus lassen sich die wirkenden Lasten sowohl in Betrag als auch Richtung in Echtzeit bestimmen. Für die Lasteinbringung werden zwei vorgespannte piezoelektrische Aktoren, welche um 90° zueinander versetzt positioniert sind, verwendet, um die dynamischen Radialkräfte zu erzeugen. Die Kräfte werden über eine Belastungseinheit, welche die Rotation der Spindelwelle mit einem weiteren Lagerpaket entkoppelt, in die Welle eingeleitet. Die Konstruktion der Belastungseinheit ermöglicht sowohl die spielfreie Aufbringung von Zug- als auch Druckkräften mit hohen Amplituden von bis zu 1.000 N. Dies erlaubt das Prüflager einerseits mit stationär wirkenden dynamischen Kräften und variierenden Frequenzen zu belasten. Ergänzend wird der Einfluss umlaufender Belastungen sowie einer Unwucht, die einer mit der Wellendrehfrequenz umlaufenden Kraft entspricht, untersucht [32]. Somit kann der Einfluss typischer Lastzustände auf den Kugelvor- und -nachlauf erfasst und bewertet werden. Die erfolgreiche prototypische Implementierung der Messsysteme zur Erfassung der Wellenverlagerung und der Kugelpositionen in einer Frässpindel erlaubt es nun, bei der Bearbeitung auf Basis real wirkender dynamischer Prozesslasten ausgehend vom kinematischen Lagerverhalten gebrauchsdauerreduzierende Betriebszustände zu identifizieren.

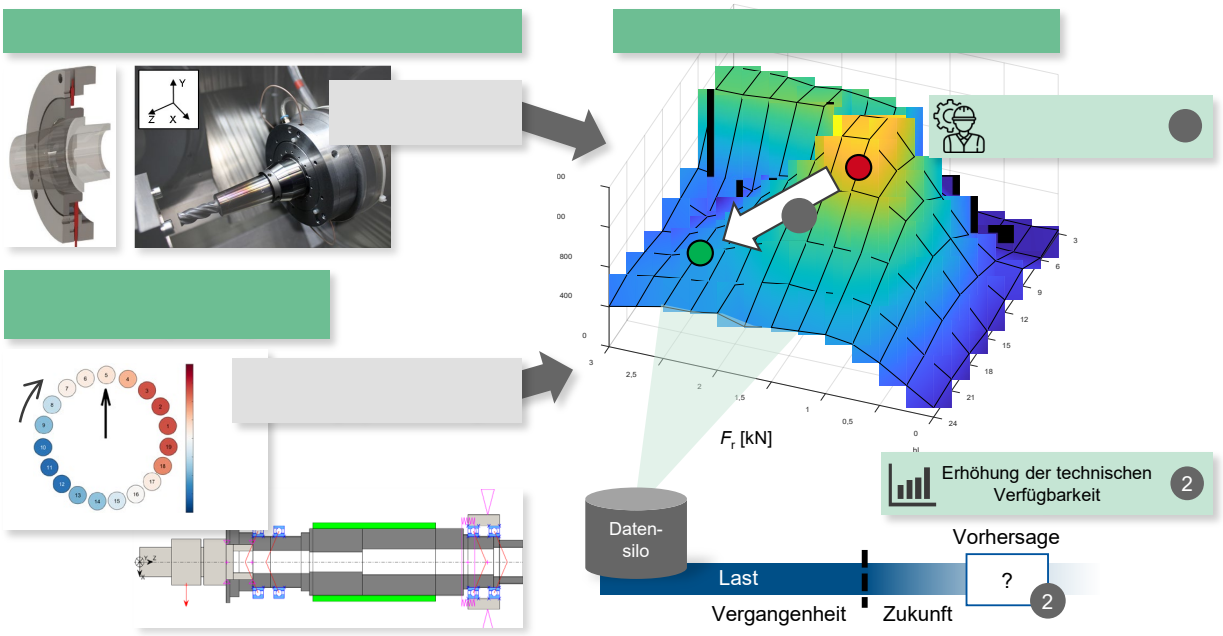


Abbildung 18: Belastungskarte eines Spindellagers zur Erhöhung der Lebensdauer

Um das entwickelte Messsystem im nächsten Schritt für die industrielle Produktion nutzbar zu machen und einen Beitrag zur Nachhaltigkeit zu leisten, muss zunächst die notwendige Datengrundlage zur Erstellung einer detaillierten und zuverlässigen Belastungskarte für diese Maschinenkomponente generiert werden (siehe Abbildung 18). Anhand dieser Informationen sowie der prozessparallelen Erfassung von übertragbaren Belastungszuständen können folgend optimale Betriebsbedingungen für die Hauptspindellagerung beachtet bzw. kritische Zustände vermieden werden, um die tatsächliche Lebensdauer dieser relevanten Maschinenkomponente zu verlängern. In Kombination mit Machine-Learning-Ansätzen lassen sich auf Basis der historischen Daten darüber hinaus

lernende Modelle entwickeln, die eine zuverlässige Vorhersage zur restlichen technischen Verfügbarkeit der einzelnen Komponente treffen können.

5.2 Erweiterte Lebensdauerberechnung von Kugelgewindetrieben

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für die Verlängerung der Nutzungsdauer von Maschinenkomponenten im Kontext aktueller Forschungsarbeiten am WZL liefert die Erweiterung bisheriger Lebensdauerberechnungen von Kugelgewindetrieben auf Basis kontinuierlich parametrierender Modelle. Ein KGT findet insbesondere in Vorschubantrieben von Werkzeugmaschinen seine Anwendung und dient dort der Umwandlung von einer Drehin eine Linearbewegung. Die Komponente bietet im Vergleich zu anderen Systemen zur Vorschuberzeugung eine Reihe von Vorteilen wie z. B. einen hohen Wirkungsgrad aufgrund der Rollreibung, Spielfreiheit sowie eine ausreichend hohe Steifigkeit [32].

Der KGT ist als Teil der Vorschubachse für die präzise Positionierung verantwortlich und nimmt somit eine zentrale Rolle in der Werkzeugmaschine ein. Die resultierende Belastung und die damit gekoppelte Lebensdauer sind aufgrund der Lage der Komponente im Kraftfluss von der Produktivität der Gesamtmaschine abhängig. Im Sinne einer ressourcenschonenden Produktion liegen dementsprechend die bestmögliche Ausnutzung und die Verlängerung der Nutzungsdauer dieser Komponente nah.

Kugelgewindetriebe weisen abhängig von ihrer Geometrie und der vorherrschenden Belastung deutlich variable innere Lastverteilungen auf. Zwar erlauben Finite-Elemente-Modelle die Ermittlung dieser Verteilungen, allerdings werden diese insbesondere bei der Lebensdauerberechnung nur unzureichend berücksichtigt. Nachfolgend wird eine Methode zur Berücksichtigung ortsdiskreter Lastverteilungen in der Lebensdauerberechnung von Kugelgewindetrieben vorgestellt.

Bei der Lebensdauerberechnung von Kugelgewindetrieben wird generell eine äquivalente Belastung und Drehzahl berechnet, die verschiedene Belastungssituationen sowie die gegebenenfalls vorhandene Vorspannung zusammenfassen. Die aus dem angenommenen Belastungskollektiv resultierende Lebensdauer L in Umdrehungen wird anschließend durch den Quotienten aus der Belastung F_m und der Belastbarkeit, welche in Form der dynamischen Tragzahl C_a ausgedrückt wird, berechnet [33]:

$$L = \left(\frac{C_a}{F_m}\right)^3 \cdot 10^6$$

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Lebensdauerberechnung nach DIN ISO 3408-5 aufgrund des zugrundeliegenden vereinfachten Lebensdauermodells einige Einflüsse wie beispielsweise das Fahrprofil oder vorliegende Montageabweichungen nicht berücksichtigt. Laut Angaben der Hersteller sollen KGT nur in axialer Richtung belastet werden. Aktuelle Berechnungsverfahren gehen davon aus, dass Momente oder Radialbelastungen durch steife Linearführungen, die parallel zum KGT montiert sind, aufgenommen werden. Mehrachsige Belastungen werden damit bei der Berechnung der Restlebensdauer nicht berücksichtigt. Bei Werkzeugmaschinen können allerdings Montageabweichungen zwischen Führungen und KGT zu Zusatzlasten führen. Aufgrund der hohen Steifigkeit des Führungssystems können selbst geringe Abweichungen zu hohen Zwangskräften führen, was eine erhebliche variierende innere Lastverteilung zur Folge hat. Hinzu kommt, dass abhängig vom Fahrprofil unterschiedliche Bereiche der Spindel unterschiedlich stark beansprucht werden, was zu einer ungleichmäßigen Verwendung des Verschleißvorrates über der Länge der Spindel führt. [34]

Am WZL wurde aus diesen Gründen die vorhandene Lebensdauertheorie um die Berechnung einer ortsaufgelösten Ermüdungslebensdauer erweitert. Basierend auf einem auf

den Kugelkontakt reduzierten Lebensdauermodell werden ortsdiskrete Komponentenbelastungen sowie die dazugehörigen kumulierten Lastwechsel berechnet. Zur Ermittlung der auftretenden Kontaktpressungen wird das am WZL entwickelte Simulationsprogramm „MTPlus“ (siehe [35]) verwendet. Die Berechnung der vom Fahrzyklus abhängigen Ermüdungslebensdauer erfordert die Kumulation der ortsbezogenen Lastwechsel unter Berücksichtigung der wirkenden Kugellast. Hierzu werden die Laufbahnen von Spindel und Mutter in Segmente im Kugelabstand unterteilt und das Fahrprofil auf Häufigkeit und Intensität der Lastwechsel untersucht [34]. Daraus ergibt sich die in Abbildung 19 gezeigte Übertragung eines Bewegungs- und Lastprofils aus einer Zeitreihe in eine Matrixschreibweise, wodurch die Zugriffszeit und Datenmenge deutlich reduziert werden. Die Belastung der einzelnen Kontaktpunkte wird aus Look-Up-Tabellen, die in vorangegangenen Simulationen berechnet wurden, abhängig von Lastrichtung und -betrag ermittelt [34].

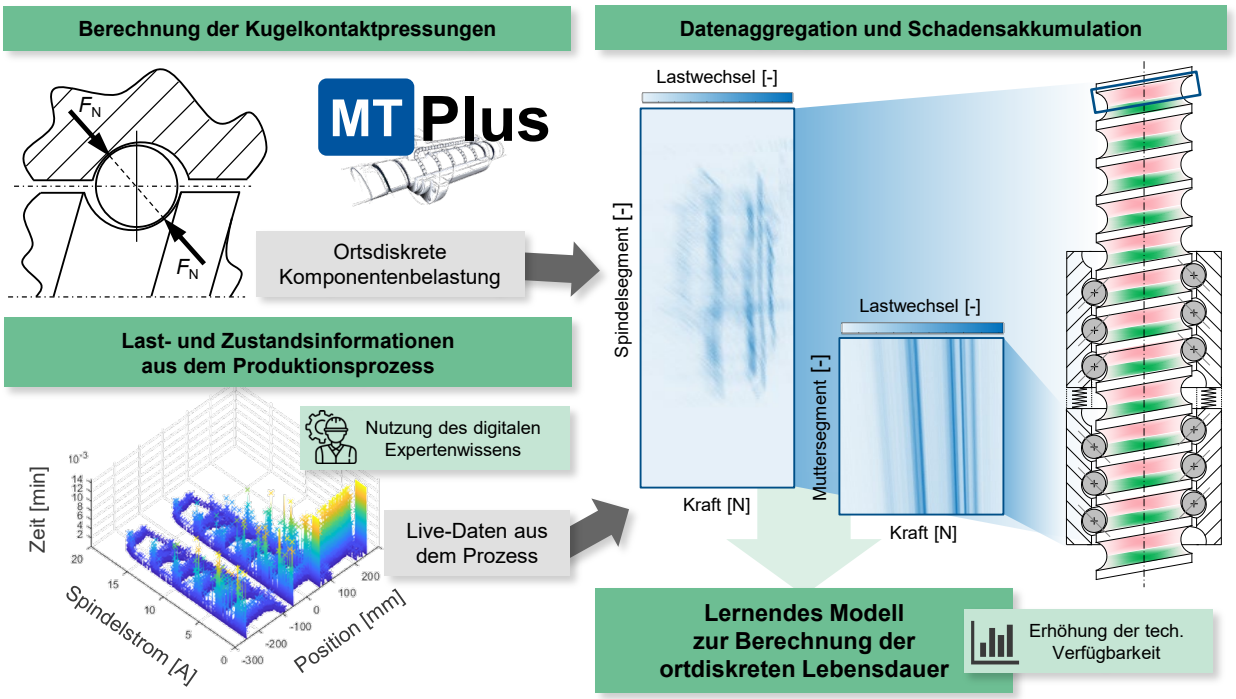


Abbildung 19: Hybrides Modell zur erweiterten Lebensdauerberechnung eines KGT nach [34]

Die Prognose der resultierenden Gesamtlebensdauer ergibt sich nachfolgend durch die Analyse der ermittelten Segmentlebensdauern mittels der Anwendung der linearen Schadensakkumulation nach Miner, welche die Gesamtschädigung jedes Laufbahnsegments berücksichtigt [34].
Eine Kombination des Ermüdungsmodells mit Live-Informationen zu den tatsächlich auftretenden Belastungskollektiven aus der Produktion erhöht dessen Vorhersagequalität. Dies steigert ferner die Zuverlässigkeit der Instandhaltungsplanung für die Komponente und kann somit einen Beitrag zur Nachhaltigkeitssteigerung leisten.
Hierfür wurde das erweiterte Lebensdauermodell, wie in [15] beschrieben, mittels dem Feedback von Last- und Zustandsinformationen aus dem Produktionsprozess, wie beispielsweise dem Spindelantriebsstrom oder der Verlagerungen, adaptiert. Das Ergebnis ist ein lernendes Modell, dass perspektivisch im Sinne einer gemeinsamen Datennutzung im Kontext der Werkzeugmaschine, wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben, über die Unternehmensgrenzen hinaus genutzt werden kann. Auf Grundlage dieses Ansatzes können Komponenten zum einen effizienter ausgelegt und somit nachweislich besser ausgenutzt werden, wodurch in der industriellen Produktion Ressourcen geschont werden.

5.3 Befähigung zur optimierten Kreislaufwirtschaft

Die beiden beschriebenen Anwendungsbeispiele ermöglichen unter der Berücksichtigung verschiedener Belastungskollektive eine präzise Vorhersage zur technischen Lebensdauer der Komponenten. Diese kann zum einen dazu dienen, Prozesse und damit einhergehende Belastungen so zu gestalten, dass eine vergleichbare Produktivität bei erheblich verlängerter Lebensdauer erzielt wird. Zum anderen befähigt sie zusätzlich eine optimierte Kreislaufwirtschaft, da das Ende des Nutzungszyklus und damit ein Komponententausch oder eine bedarfsgerechte Aufbereitung planbarer werden. Im Kontext der Werkzeugmaschine spielt insbesondere für hochpreisige und essentielle Teilsysteme wie die Hauptspindel eine zuverlässige zustandsbasierte Prädiktion der Restgebrauchsdauer eine wichtige Rolle bei der Verlängerung der Lebensdauer. Bezogen auf das erste vorgestellte Anwendungsbeispiel kann der Belastungszustand der Spindellager genauer bestimmt werden, es treten weniger Schäden oder Ausfälle auf und die Hauptspindel kann nach einer fälligen Aufbereitung den Weg in einen weiteren Nutzungszyklus finden. Eine gezielte Aufbereitung oder Erneuerung von solchen verschleiß- und abnutzungsbehafteten Systemen verlängert den Lebenszyklus einer Maschine und trägt damit direkt zur Minimierung des ganzheitlichen Ressourceneinsatzes bei.

Zusätzlich zu einer zustandsbasierten Instandhaltung und Wiederverwendung von hochpreisigen Komponenten stellt hardware- und softwareseitig eine modulare Gestaltung der Maschine einen ergänzenden Ansatz zur Optimierung der Kreislaufwirtschaft dar. Wenn beispielsweise bereits während des Konstruktionsprozesses einer Maschine und ihrer Teilsysteme ein modulares Design, welches zudem den Austausch von einzelnen Verschleißkomponenten beachtet, vorgesehen wird, ermöglicht dies einen schnellen und flexiblen Ein- und Ausbau von Maschinenkomponenten im Rahmen der Instandhaltung. Eine unmittelbare Reduktion der Ausfallzeit ist die Folge. Besitzt die Maschine des Weiteren eine Updatefähigkeit, lässt sich ihr Lebenszyklus zusätzlich verlängern, indem beispielsweise ein veraltetes Softwaremodul aus der Steuerung erneuert wird.

6 Vision einer gemeinsamen Datennutzung

Neben der reinen Fertigungsoptimierung befähigt die Digitalisierung des Expertenwissens Unternehmen zu einem Wissensaustausch zwischen erfahrenem auf unerfahrenem Personal. Die Extraktion des Wissens und dessen Persistierung ist zunächst geschütztes Unternehmens-Know-how, das abteilungsübergreifende Verwertungsmöglichkeiten bietet. Ferner hilft die Speicherung des Expertenwissens Unternehmen, dem demographischen Wandel zu begegnen, da dieses Wissen nun dauerhaft verfügbar ist.

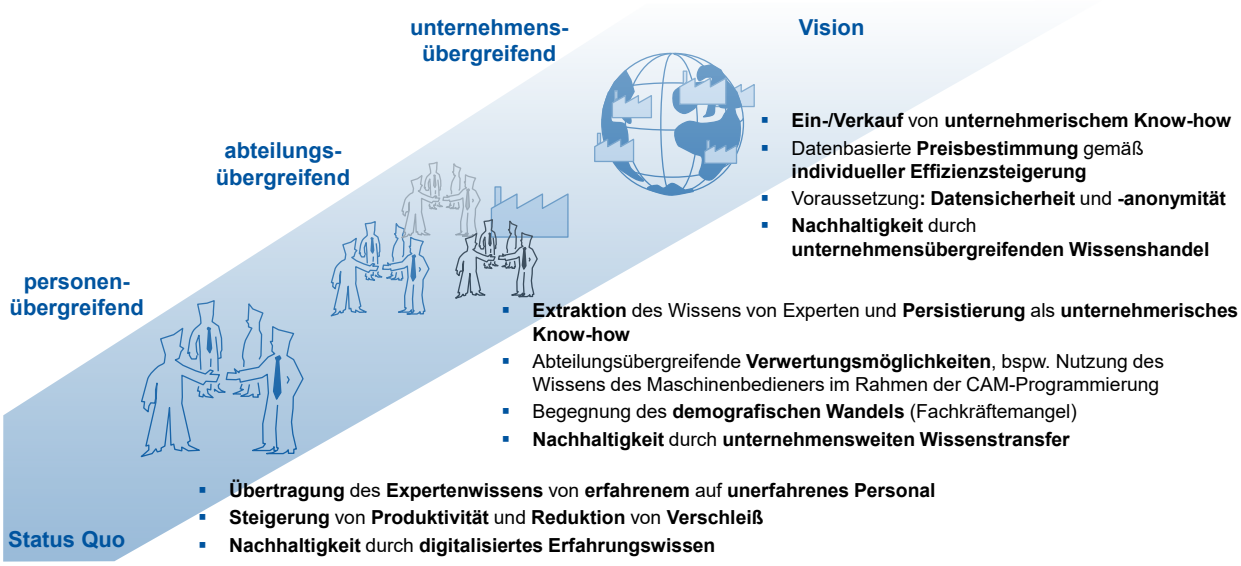


Abbildung 20: Gemeinsame Datennutzung als Beitrag zur Nachhaltigkeitssteigerung

Das übergeordnete Ziel muss allerdings sein, Daten und Know-how unternehmensübergreifend verfügbar zu machen. Nur hierdurch ist es möglich, Nachhaltigkeit im Sinne der FESG-Faktoren breitflächig zu steigern. Damit ein globaler Wettbewerb zwischen Unternehmen entsteht, nachhaltigkeitssteigernde Daten oder nachhaltigkeitssteigerndes Know-how breitflächig zu teilen, sind monetäre Anreize durch neue Rahmenwerke in Form neuer Geschäftsmodelle zu schaffen. Voraussetzung hierfür ist stets die Datensicherheit und -anonymität. Die gespeicherten Prozessparameterwerte ermöglichen keinen Rückschluss auf das gefertigte Produkt sowie dessen Fertigungsstrategie. Durch den gezielten Verkauf dieser Prozessparameter lassen sich unternehmensübergreifend Prozesse optimieren, ohne das die eigene Wettbewerbsfähigkeit gefährdet wird. Die Preisbestimmung dieser Daten muss datenbasiert auf Grundlage der individuellen Effizienzsteigerung geschehen. Durch den unternehmensübergreifenden Wissenshandel steigert sich somit nicht nur die Nachhaltigkeit von produzierenden Unternehmen, sondern es wird ebenfalls ein neuer Markt für Daten- und Wissenshandel erschlossen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Produktionsbranche sieht sich auf Grund von tiefgreifenden globalen Veränderungsprozessen stärker denn je mit der Nachhaltigkeitstransformation konfrontiert. In diesem Zusammenhang widmet sich der Beitrag dem Ziel, konkrete Ansätze zur Nachhaltigkeitssteigerung durch die Minimierung des gesamtheitlichen Ressourceneinsatzes in der industriellen Produktion zu liefern. Im Kontext des Anwendungsfalls einer Werkzeugmaschine werden folgende vier Zielgrößen zur Gestaltung von *Nachhaltigkeit in Produktionslinien* benannt: Senkung der prozessunabhängigen Grundlast der Nebenaggregate, bedarfsorientierter Betrieb von energieeffizienten Nebenaggregaten, Minimierung der Prozesszeit und Maximierung der Nutzungsdauer.

Basierend auf den jüngsten Forschungsaktivitäten des WZL werden zu den einzelnen Zielgrößen konkrete Anwendungsfälle vorgestellt. Während für die Erreichung einer Grundlastsenkung auf den Einsatz energieeffizienter Nebenaggregaten eingegangen wird, befasst sich das Kapitel über den bedarfsorientierten Einsatz dieser energieeffizienten Nebenaggregate im Speziellen mit einer intelligenten modellprädiktiven Reglung für

aktive Kühlsysteme von Werkzeugmaschinen. Eine modellprädiktive Kühlung ermöglicht, lange Warmlaufphasen einer Maschine zu verkürzen und somit sofort qualitätsgerecht bei gleichzeitig reduziertem Energieeinsatz zu fertigen. Der Energieverbrauch pro Bauteil kann zusätzlich gesenkt werden, indem Prozesszeiten durch produktivitätssteigernde Maßnahmen minimiert werden. Hierzu muss Expertenwissen hinsichtlich optimaler Betriebsparameter, z. B. von Prozessplaner oder Maschinenbediener, digitalisiert und objektiviert werden und schließlich durch Kennwerte in übertragbarer Form vorliegen. Die übergreifende Verfügbarkeit des Expertenwissens ist dann Grundlage für eine Steigerung von Produktivität und Qualität. In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Nutzung und Generierung von digitalem Expertenwissen anhand des Beispiels von Prozessparameter-Karten präsentiert.

Analog kann dieses Vorgehen zur Verlängerung der Nutzungsphase von Maschinen und relevanten Komponenten wie die Hauptspindel Anwendung finden. Entlang der Gebrauchsdauer werden Belastungszustände prozessparallel erfasst. Die Übertragbarkeit der Kenngrößen ermöglicht die Nutzung von Machine-Learning Ansätzen zur Prognose von Zustand und Lebensdauer in Abhängigkeit der Betriebsparameter. Das generierte Expertenwissen, z. B. in Form von Informationen über optimale Betriebsbedingungen für eine Hauptspindel, muss im Anschluss wiederum digitalisiert werden. In diesem Zug wird auch die Kreislaufwirtschaft optimiert, da Zustände der Komponenten genauer bekannt sind, weniger Schäden oder Ausfälle auftreten und die Komponenten somit den Weg in einen weiteren Nutzungszyklus finden können. Im Hinblick auf die Verlängerung der Nutzungsdauer liegt der Fokus des Beitrags auf der Vorstellung eines Messsystems zur prozessparallelen Bestimmung von gebrauchsdauerreduzierenden Betriebszuständen der Hauptspindellagerung.

Den Anwendungsfällen zur Steigerung von Produktivität und Nutzungsdauer liegt die Extraktion und Digitalisierung von Expertenwissen zugrunde. Abschließend wird eine Vision zur unternehmensinternen und -übergreifenden Nutzung dieses Wissens vorgestellt. Die Extraktion und Digitalisierung von Expertenwissen unterstützt Unternehmen bei dem dauerhaften Erhalt von unternehmensinternem Know-how. Die Weitergabe von Expertenwissen auf neues, unerfahrenes Personal wird erleichtert und dem Fachkräftemangel infolge des demografischen Wandels entgegengewirkt. Weiter bieten sich abteilungsübergreifende Verwertungsmöglichkeiten an, indem beispielsweise Wissen des Maschinenbedieners im Rahmen der CAM-Programmierung genutzt wird. Damit ein globaler Wettbewerb zwischen Unternehmen entsteht, nachhaltigkeitssteigerndes Know-how breitflächig zu teilen, sind monetäre Anreize durch neue Rahmenwerke in Form neuer Geschäftsmodelle zu schaffen. Dabei stehen eine datenbasierte Preisbestimmung gemäß der erzielten individuellen Nachhaltigkeitssteigerung sowie die Beachtung der Datensicherheit und -anonymität im Vordergrund.

8 Literatur

[1] O. Kienzle, „Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen," *VDI-Z*, Jg. 94, Nr. 11, S. 299–305, 1952.

[2] Y. Altintas und P. Lee, „Mechanics and Dynamics of Ball End Milling," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Jg. 120, Nr. 4, S. 684-692, 1998, doi: 10.1115/1.2830207.

[3] *ISO 281:1990, Rolling bearings; basic dynamic load ratings and basic rating life*, 281:1990, ISO International Organization for Standardization, 1990.

[4] F. Wellmann, *Datengetriebene, kontextadaptive Produktivitätssteigerung von NC-Zerspanprozessen* (Ergebnisse aus der Produktionstechnik 45/2019). Aachen: Apprimus, 2019.

[5] Y. Yamada und Y. Kakinuma, „Sensorless cutting force estimation for full-closed controlled ball-screw-driven stage," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 87, Nr. 9-12, S. 3337-3348, 2016, doi: 10.1007/s00170-16-8710-5.

[6] M. Fey, A. Epple, S. Kehne und C. Brecher, „Verfahren zur Bestimmung der Achslast auf Linear- und Rundachsen," DE102016013890, 24. Mai 2018.

[7] M. Königs und C. Brecher, „Process-parallel virtual quality evaluation for metal cutting in series production," *Procedia Manufacturing*, Jg. 26, S. 1087-1093, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.145.

[8] C. Brecher, H.-M. Eckel, T. Motschke, M. Fey und A. Epple, „Estimation of the virtual workpiece quality by the use of a spindle-integrated process force measurement," *CIRP Annals,* Jg. 68, Nr. 1, S. 381-384, 2019, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.020.

[9] C. Brecher, A. Epple, M. Fey, M. Königs, S. Neus und F. Wellmann, „Lernende Produktionssysteme," in *Internet of Production für agile Unternehmen: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2017, 18. bis 19. Mai,* C. Brecher, F. Klocke, R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2017, S. 135-161.

[10] C. Brecher, V. Lohrmann, M. Wiesch und M. Fey, „Clustering zur Bestimmung von Werkzeugverschleiß: Hybride Modellierung durch automatisches Clustering von Prozessverhalten zur Vorhersage von Werkzeugverschleiß bei der Fräsbearbeitung," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb,* Jg. 117, Nr. 4, S. 218-223, 2022, doi: 10.1515/zwf-2022-1027.

[11] C. Brecher, M. Brockmann, B. Biernat, N. Frenkel und S. Neus, „Modellbasierte Datenanalyse als Basis für Zustandsüberwachung in Werkzeugmaschinen," in *Steel and more: ASK 34: Aachener Stahlkolloquium: 19. November 2020: Online-Konferenz: Tagungsband,* U. Krupp and S. Münstermann, Hg., 2020, S. 9-18.

[12] B. Denkena, B. Bergmann und D. Stoppel, „Reconstruction of Process Forces in a Five-Axis Milling Center with an LSTM Neural Network in Comparison to a Model-Based Approach," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Jg. 4, Nr. 3, Art.-Nr. 62, 2020, doi: 10.3390/jmmp4030062.

[13] S. M. R. Mekarthy, „A combined finite element and machine learning approach for predicting specific cutting forces and maximum tool temperatures during orthogonal machining," Dissertation, Charlotte, The University of North Carolina at Charlotte, 2019.

[14] M. Königs, F. N. Wellmann, M. Wiesch, A. Epple und C. Brecher, „A scalable, hybrid learning approach to process-parallel estimation of cutting forces in milling applications," in *7. WGP-Jahreskongress Aachen, 5.-6. Oktober 2017,* R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2017, S. 425-432.

[15] C. Brecher *et al.,* „Data Science in Production," in *Internet of Production - Turning Data into Sustainability: AWK'21,* T. Bergs, C. Brecher, R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2021, S. 202-230.

[16] S. Bäumler *et al.,* „Resource efficiency in machine tool manufacturing," in *Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Perspektiven: AWK, Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2011, 26. bis 27. Mai: Tagungsband*, C. Brecher F. Klocke, R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2011, S. 157-193.

[17] C. Brecher, Hg., *Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb - EWOTeK: Verbundprojekt im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen", „Ressourceneffizienz in der Produktion" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)*. Aachen: Apprimus, 2012.

[18] B. Denkena, E. Abele, C. Brecher, M.-A. Dittrich, S. Kara und M. Mori, „Energy efficient machine tools," *CIRP Annals,* Jg. 69, Nr. 2, S. 646-667, 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.05.008.

[19] „Maximierung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen: Schlussbericht zum Projekt Maxiem: Projektlaufzeit: 01.12.2008 bis 30.11.2012," E. Abele, Darmstadt, 2013. Zugriff am: 23. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.2314/GBV:782530303

[20] L. Hülsemeyer, *Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen und bedarfsgerechter Betrieb am Beispiel der inneren Kühlschmierstoffzufuhr* (Berichte aus dem IFW). Garbsen: TEWISS, 2019.

[21] D. Jasper, *Methodik zur investitionskosten-neutralen Steigerung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen* (Ergebnisse aus der Produktionstechnik 6/2019). Aachen: Apprimus, 2019.

[22] C. Brecher, S. Bauer, W. Herfs, W. Klein und J. Triebs, "Ressourceneffiziente Maschinensysteme," in *Ressourceneffiziente Produktionstechnik: Ein Aachener Modell: Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Fritz Klocke*, W. Eversheim, M. Weck, C Brecher, R. Schmitt, G. Schuh und T. Pfeifer, Hg., Aachen: Apprimus, 2010, S. 54–86.

[23] C. Brecher und M. Weck, *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2: Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung* (VDI-Buch), 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.

[24] K. Großmann und M. Löser, „Synthesis of Stability Lobe Diagrams," in *Process Machine Interactions: Predicition and Manipulation of Interactions between Manufacturing Processes and Machine Tool Structures* (Lecture Notes in Production Engineering), B. Denkena und F. Hollmann, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, S. 225–244.

[25] C. Brecher, H.-M. Eckel, M. Fey und F. Butz, „Prozesskraftmessung mit spindelintegrierter Sensorik," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 113, Nr. 10, S. 660–663, 2018, doi: 10.3139/104.111982.

[26] C. Qin, J. Tao, H. Shi, D. Xiao, B. Li und C. Liu, „A Legendre wavelet‐based stability prediction method for high-speed milling processes," *The International Journal*

of Advanced Manufacturing Technology, Jg. 108, Nr. 7-8, S. 2397–2408, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05423-6.

[27] M. Li, G. Zhang und Y. Huang, „Complete discretization scheme for milling stability prediction," *Nonlinear Dynamics*, Jg. 71, Nr. 1-2, S. 187–199, 2013, doi: 10.1007/s11071-012-0651-4.

[28] H. Z. Li, X. P. Li und X. Q. Chen, „A novel chatter stability criterion for the modelling and simulation of the dynamic milling process in the time domain," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 22, Nr. 9-10, S. 619–625, 2003, doi: 10.1007/s00170-003-1562-9.

[29] C. Brecher, P. Chavan und M. Fey, „Efficient joint identification and fluted segment modelling of shrink-fit tool assemblies by updating extended tool models," *Production Engineering*, Jg. 15, Nr. 1, S. 21–33, 2021, doi: 10.1007/s11740-020-00999-0.

[30] M. Schwenzer, S. Stemmler, M. Ay, T. Bergs und D. Abel, „Continuous identification for mechanistic force models in milling," *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 52, Nr. 13, S. 1791–1796, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.461.

[31] T. A. Harris und M. N. Kotzalas, *Roller Bearing Analysis: Essential concepts of bearing technology,* 5. Aufl. Boca Raton: CRC, 2007.

[32] H.-M. Eckel, C. Brecher und S. Neuss, „Kugelbewegung in Spindellagern unter dynamischer Belastung," *Tribologie und Schmierungstechnik*, Jg. 69, eOnly Sonderausgabe 2, S. 10–16, 2022, doi: 10.24053/TuS-2022-0033.

[33] *DIN ISO 3408-5:2011-04, Kugelgewindetriebe - Teil 5: Statische und dynamische axiale Tragzahl und Lebensdauer*, 3408-5:2011-04, ISO Internationale Organisation für Normung, 2011.

[34] C. Brecher, B. Biernat und S. Neus, „Lastverteilungen in Kugelgewindetrieben," *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 111, Nr. 5, S. 271–276, 2021, doi: 10.37544/1436-4980-2021-05.

[35] C. Brecher, B. Eßer, J. Falker, F. Kneer und M. Fey, „Modelling of ball screw drives rolling element contact characteristics," *CIRP Annals*, Jg. 67, Nr. 1, S. 409–412, 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.109.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 3.1:

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen

Dr.-Ing. Marcel Fey, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Matthäus Loba, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Oscar Malinowski, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Janis Ochel, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Janis Schäfer, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Alexander Steinert, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Marcel Wittmann, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

3.2 Nachhaltige Produktion-as-a-Service

C. Brecher, O. Petrovic, Y. Dassen, P. Blanke, M. Trinh, S. Wurm

Gliederung

1 Einleitung 249

2 Nachhaltigkeit in der Produktion 250
2.1 Nachhaltigkeitsbilanzierung in der Produktion 250
2.2 Wie kann die Produktion nachhaltiger gestaltet werden? 251

3 Enabler für eine nachhaltige Produktion 254
3.1 Digital Twin 254
3.2 Virtualisierung 255
3.3 Industrial Metaverse 257
3.4 Künstliche Intelligenz für die Produktionstechnik 258

4 Sustainable Production-as-a-Service 260
4.1 As-a-Service im digitalen Zeitalter 261
4.2 As-a-Service als Enabler für eine nachhaltige Produktion 262

5 Beispiele aus der Industrie und Forschung 264
5.1 Ladungsträger-as-a-Service 264
5.2 Spannvorrichtung-as-a-Service 265
5.3 Echtzeit-Virtualisierung einer NC-Steuerung 266
5.4 Anwendung von Industrial Metaverse 267
5.5 Hybride Intelligenz in der Montage von Elektromotoren 269

6 Zusammenfassung und Ausblick 271

7 Literatur 272

doi: 10.24406/publica-965

Kurzfassung

Nachhaltige Produktion-as-a-Service

Die Produktion trägt signifikant zu den weltweiten CO_2-Emissionen bei. Effizienzsteigerungen, Ressourcenschonung und Vermeidung von Überproduktion sind wirtschaftliche Ziele, die nun auch im Kontext der Nachhaltigkeit verstärkt in den Fokus rücken. Der Einsatz digitaler Technologien kann diese Ziele adressieren und die Ausschöpfung von bisher wenig genutzten Nachhaltigkeitspotenzialen ermöglichen. Die Digitalisierung ist ein übergreifender Lösungsbaustein, der das Erheben und Auswerten von Daten ermöglicht und auf dessen Grundlage optimierte Produktionsabläufe entwickelt werden können. Eine ganzheitliche Datenerfassung über den vollständigen Lebenszyklus eines Produktes hinweg erfolgt beispielsweise mit Hilfe von digitalen Zwillingen. Darauf aufbauend bietet die Virtualisierung das Potenzial, den Lebenszyklus von Produktionssystemen signifikant zu verlängern. Weitere erfolgsversprechende Technologien sind virtuelle Umgebungen wie das Metaverse oder die künstliche Intelligenz. Der zum Teil hohe Investitionsbedarf bzw. die mangelnde Transparenz bezüglich des Return of Investment und das Fehlen der notwendigen Expertise hinsichtlich der Implementierung und Pflege der digitalen Technologien hemmt viele Mittelständler bei der Umsetzung. Diesem Umstand kann mit dem gekapselten Anbieten der digitalen Lösungen „as-a-Service“ (aaS) begegnet werden. Daher werden in diesem Beitrag die Chancen zur Steigerung der Nachhaltigkeit durch digitale Technologien sowie die Voraussetzungen für deren Umsetzung erläutert. Anschließend werden anhand praktischer Beispiele die Möglichkeiten der Nutzung dieser Technologien im Rahmen von "as-a-Service"-Modellen aufgezeigt.

Schlagwörter: Digitalisierung, Steuerungsvirtualisierung, Metaverse, KI, as-a-Service

Abstract

Sustainable Production-as-a-Service

Production contributes significantly to global CO_2 emissions. Increasing efficiency, conserving resources and avoiding overproduction are economic goals that are increasingly coming into focus in the context of sustainability. The use of digital technologies can address these goals and enable the exploitation of previously underutilized sustainability potentials. Digitization is an overarching solution module that enables data to be collected and evaluated, and based on which optimized production processes can be developed. Holistic data collection across the entire lifecycle of a product is achieved, for example, with the help of digital twins. Building on this, virtualization offers the potential to significantly extend the life cycle of production systems. Other promising technologies are virtual environments such as the Metaverse or artificial intelligence. The often high investment requirements or the lack of transparency about the return on investment and the lack of the necessary expertise regarding the implementation and maintenance of digital technologies inhibit many small and medium sized enterprises in their implementation. This circumstance can be countered with the encapsulated offering of digital solutions "as-a-Service" (aaS). This article therefore explains the opportunities for increasing sustainability through digital technologies and the prerequisites for their implementation. Practical examples will then be used to illustrate the possibilities for using these technologies within the framework of "as-a-service" models.

Keywords: digitization, control virtualization, Metaverse, AI, as-a-service

1 Einleitung

Im Jahr 2015 wurden die ökologischen, ökonomischen und sozialen Ziele der Vereinten Nationen durch die Verabschiedung der Agenda 2030 mit der Definition von 17 Zielen (Sustainable Development Goals, SDGs) präzisiert [1]. Der Begriff „Nachhaltigkeit“ umfasst demnach mehrere Aspekte und geht über das weithin verbreitete Verständnis des Klima- und Umweltschutzes durch Ressourcenschonung und Emissionsreduktion hinaus. Das 12. Ziel der SDGs adressiert dabei konkret den nachhaltigeren Konsum als auch die nachhaltigere Produktion von Gütern und fordert Unternehmen somit zu direktem Handeln bezüglich ihrer Produkte und Prozesse auf. Dementsprechend wird dieses Ziel von den meisten produzierenden Unternehmen durch deren Strategien zur Förderung der Nachhaltigkeit verfolgt [2].

Die Produktion verursacht 42% der weltweiten CO_2-Emissionen (aus der Verbrennung von Brennstoffen) und macht damit einen signifikanten Anteil aus. In Kombination mit der Logistik sogar 53 %. Um eine Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf 1,5°C zu erreichen, ist daher eine deutliche Reduzierung der Emissionen in der Produktion erforderlich (siehe Abbildung 1). Es muss darauf abgezielt werden, den Ressourcenverbrauch zu reduzieren und Überproduktion zu vermeiden, während gleichzeitig die Effizienz und Langlebigkeit der Produktionslinien sowie die Wiederverwendung von Komponenten im Sinne einer Kreislaufwirtschaft fokussiert werden.

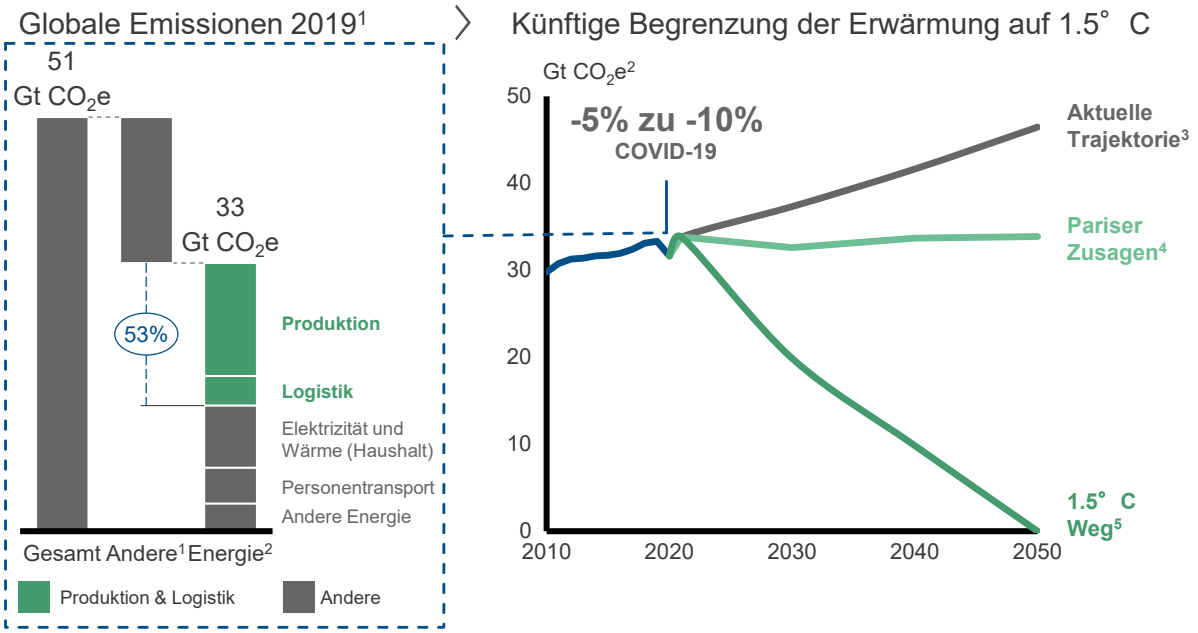


Abbildung 1: Reduktion der Emissionen in der Produktion notwendig. Quellen: IPCC; IEA; Climatewatch; BCG[1]

[1] 1. Keine energiebezogenen Emissionen aus Landwirtschaft, Abfall, industriellen Prozessen und Produkten 2. Nur CO_2-Emissionen aus der Verbrennung von Brennstoffen 3. Annahme, dass die energiebedingten Emissionen nach 2018 weiterhin um 1,1 % pro Jahr steigen 4. Annahme, dass die Länder bis 2030 gemäß ihren beabsichtigten nationalen Beiträgen (INDCs) dekarbonisieren und bis 2050 auf demselben Emissionspfad bleiben 5. Annahme einer 45%igen Reduzierung bis 2030 und einer Netto-Nullrunde bis 2050.

Der Einsatz digitaler Technologien kann diese Ziele adressieren und bietet darüber hinaus die Chance, die Ausschöpfung bisher weniger genutzter Potenziale im Hinblick auf eine nachhaltige und zirkulare Produktion zu ermöglichen. Die Digitalisierung ist dabei ein übergreifender Lösungsbaustein, der das Erheben und Auswerten von Daten z. B. über den Energieverbrauch einzelner Prozesse oder Maschinen ermöglicht und somit zur Identifikation kritischer Prozesse befähigt. Darauf aufbauend bieten unter anderem die Virtualisierung von Funktionalitäten, die Nutzung des Industrial Metaverse und der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) in der Produktion vielversprechende Möglichkeiten zur Steigerung der Nachhaltigkeit.

Der zum Teil hohe Investitionsbedarf bzw. die mangelnde Transparenz bezüglich des Return of Investment (ROI) und das Fehlen der notwendigen Expertise hinsichtlich der Implementierung und Pflege dieser digitalen Technologien hemmt jedoch aktuell noch viele Mittelständler bei der Umsetzung. Gleichzeitig bedingen die teils schwankende Kundennachfrage sowie instabile Lieferketten und damit einhergehende Produktionsausfälle eine gewisse Flexibilität und Agilität, denen langfristige Investitionen entgegenstehen.

Diesem Umstand kann mit dem gekapselten Anbieten der digitalen Lösungen „as-a-Service“ (aaS) begegnet werden: Auf der wirtschaftlichen Seite bieten die damit verbundenen Zahlungsmodelle den Unternehmen Einstiegsmöglichkeiten mit deutlich reduziertem finanziellem Risiko, während die durch aaS geförderte, bedarfsgerechte Inanspruchnahme von Ressourcen die Nachhaltigkeit unterstützt. Der Kunde erhält die Möglichkeit, ein breites Angebot an digitalen Technologien, physischen Assets und zugehörigen Services auszuprobieren, um eine optimale Lösung zu finden.

Daher werden in diesem Beitrag die Chancen zur Steigerung der Nachhaltigkeit durch digitale Technologien sowie die Voraussetzungen für deren Umsetzung erläutert. Anschließend werden anhand praktischer Beispiele die Möglichkeiten der Nutzung dieser Technologien im Rahmen von aaS-Ansätzen aufgezeigt.

2 Nachhaltigkeit in der Produktion

2.1 Nachhaltigkeitsbilanzierung in der Produktion

Die Umweltbelastung wird durch diverse Faktoren beeinflusst, wobei etwa die Hälfte des ökologischen Fußabdruckes auf den Ausstoß von CO_2-Emmissionen zurückzuführen ist. Im Sinne der Nachhaltigkeit gehört die Reduktion des ökologischen Fußabdrucks zu den primären Zielen produzierender Unternehmen [3].

Viele strategische Entscheidungen, wie beispielsweise die Reduktion der Nutzung von Ressourcen, weisen eine Überschneidung zwischen den Zielen der Nachhaltigkeit und der Wirtschaftlichkeit auf. Inzwischen werden Entscheidungen jedoch nicht mehr nur auf Grundlage rein wirtschaftlicher Bewertungskriterien getroffen, sondern es fließen zunehmend ökologische Faktoren in den Entscheidungsprozess mit ein. Eine ökologische Bilanzierung liefert nicht nur eine Aussagefähigkeit gegenüber Geschäftspartnern und Kunden, sondern auch Erkenntnisse über kritische Prozesse, die einen negativen Einfluss auf eine nachhaltige Fertigung eines Produktes haben [4], [5].

Zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten, sind realistische, aussagekräftige und vergleichbare Größen notwendig, weshalb produzierende Unternehmen Bilanzierungsansätze zur Quantifizierung entwickelt haben. Dabei stellt das Setzen geeigneter Bilanzgrenzen eine große Herausforderung dar, da nicht jeder Einfluss direkt messbar und ei-

nem bestimmten Produkt zugeordnet werden kann. Ein erheblicher Teil des Energieverbrauches und der Emissionen wird durch Hilfsprozesse, Infrastruktur, Transport oder Peripherie wie Beleuchtung, Beheizung oder Klimatisierung verursacht und muss daher in die Gesamtbetrachtung mit einbezogen werden.

Eine umfassende Metrik zur Bilanzierung von Produkten während des gesamten Lebenszyklus liefert das Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse – LCA). Bei einer LCA-Analyse kann der gesamte Lebenszyklus eines Produkts oder Services von der Herstellung bis zum End of Life (EOL) bilanziert werden. Eine LCA-Analyse geht über die Bilanzierung der Treibhausgase (THG) hinaus und berücksichtigt weitere Faktoren, die einen Einfluss auf die Umwelt haben, wie z. B. die Verschmutzung des Grundwassers. Die Quantifizierung bezieht sich dabei immer auf einen Status des Produktes in seinem Produktlebenszyklus. Bilanziert werden kann z. B. von der Herstellung bis zum Verlassen der Fabrik (Cradle-to-Gate) oder von der Herstellung bis zum EOL (Cradle-to-Grave) [6].

Eine weitverbreitete Richtlinie zur Bilanzerstellung, stellt die ISO 14060 dar [7]. Die Normreihe liefert ein Rahmenwerk zur Quantifizierung, Überwachung, Berichterstattung und Validierung oder Verifizierung von Treibhausgasemissionen [8]. Zur Vereinfachung der Vergleichbarkeit werden CO_2-Äquivalente eingeführt. Die Emissionen der einzelnen Treibhausgase (CO_2, CH_4, N_2O, usw.) werden separat berechnet und anschließend auf der Grundlage ihres Potenzials zur globalen Erwärmung in CO_2-Äquivalente umgerechnet [7]–[9]. Die Norm kann als generischer Standard zur Quantifizierung des CO_2-Footprints von Produkten (PCF – Produkt-CO_2-Fußabdruck) gesehen werden [8]. Neben des PCF kann die Bilanzierung unternehmensseitig durchgeführt werden und in einem Coperate Carbon Footprint (CCF - Unternehmens-CO_2-Fußabdruck) quantifiziert werden [10].

2.2 Wie kann die Produktion nachhaltiger gestaltet werden?

Zur Umsetzung einer nachhaltigeren Produktion existieren verschiedene Lösungskonzepte. In diesem Absatz werden Ansätze der Kreislaufwirtschaft, der Steigerung der Effizienz und der Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten detaillierter erläutert (siehe Abbildung 2).

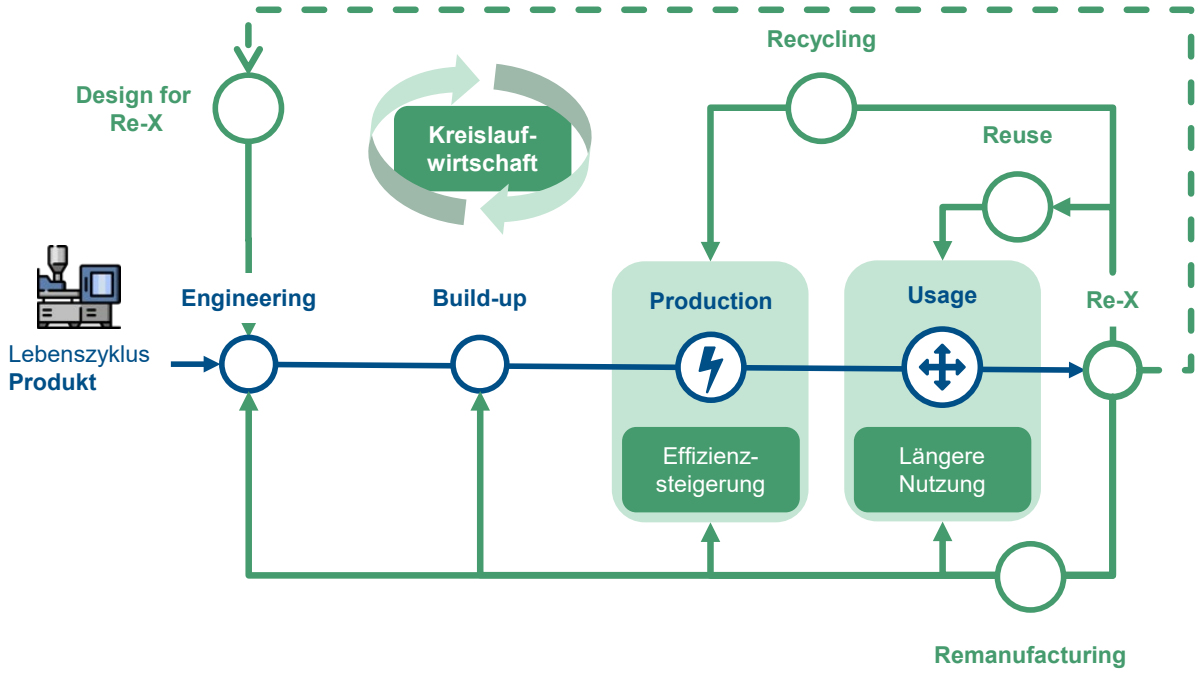


Abbildung 2: Nachhaltigkeitspotenziale entlang der Wertschöpfungskette

Kreislaufwirtschaft

Die Status Quo der Produktion basiert heute typischerweise auf linearen Prozessen des „Nehmens, Herstellens und Entsorgens“, woraus ein hoher Verbrauch und eine geringe Wiederverwendung von Rohstoffen resultiert. Bei der Betrachtung des gesamtem Lebenszyklus eines Produktes kann die Kreislaufwirtschaft einen vielversprechenden Beitrag zur Schonung der Ressourcen leisten. Global und branchenübergreifend betrachtet, lassen sich so mit 70% der bereits jetzt verfügbaren Materialien die Bedürfnisse der Menschheit erfüllen. Aus diesem Grund hat z. B. die japanische Regierung beschlossen, bis 2050 ein vollständiges kreislauffähiges System zu etablieren und fördert entsprechende Maßnahmen [11].

Zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft können verschiedene Ansätze verfolgt werden. In der Literatur haben sich sogenannte “R-Strategien” etabliert, die Handlungsfelder (z. B. Recycling, Remanufacturing oder Reuse) aufzeigen, um den Material- und Ressourcenverbrauch zu minimieren. Alle Listen von R-Strategien ähneln einander und unterscheiden sich hauptsächlich durch die Anzahl der von ihnen vorgeschlagenen und auf Kreislauf bezogenen Wirtschaftsstrategien. Im Produktionsumfeld sind folgende Beispiele von R-Strategien häufig aufzufinden (vgl. *Tabelle 1*) [12], [13].

Tabelle 1: Auswahl von R-Strategien der Kreislaufwirtschaft

Reuse
Wiederverwendung von Produkten: Wiederverwendung eines ausrangierten Produkts, das noch in gutem Zustand ist und seine ursprüngliche Funktion erfüllt, durch einen anderen Verbraucher
Remanufacture
Wiederaufbereitung: Teile eines ausrangierten Produkts werden in einem neuen Produkt mit der gleichen Funktion verwendet
Recycle
Wiederverwertung: Bereits verarbeitete Materialien werden erneut verarbeitet, um die gleiche oder eine niedrigere Qualität zu erhalten
Reduce
Reduktion: Der Ressourcenaufwand wird möglichst geringgehalten. Im Designprozess der Produkte kann hier der größte Einfluss genommen werden, indem z. B. mit Hilfe einer Topologieoptimierung der initiale Materialbedarf minimiert wird

Solche R-Strategien können um weitere Punkte ergänzt werden. Oftmals wird in der Literatur alles zur Verfolgung der Material- und Ressourcenschonung der Kreislaufwirtschaft zugeordnet. Die Steigerung der Effizienz kann bspw. der Reduce-Strategie oder die Verlängerung der Nutzungsdauer der Rethink-Strategie zugeordnet werden [12], [13]. In den folgenden Absätzen werden die Steigerung der Effizienz und die Verlängerung der Lebensdauer thematisch nicht der Kreislaufwirtschaft zugeordnet, sondern als eigenständige Maßnahmen behandelt.

Bezogen auf die Produktion ist die Umsetzbarkeit einer Kreislaufwirtschaft von folgenden Hauptfaktoren abhängig: Steigerung der Informationsverfügbarkeit, Design for Re-X und

Implementierung digitaler Lösungen entlang der Wertschöpfungskette. Ein Informationslieferant, digitale Lösung und somit Befähiger für Kreislaufwirtschaft ist der Digital Twin, welcher in diesem Kontext in Kapitel 3.1 näher beschrieben wird [14], [15]. Aus technischer Sicht ist Design for Re-X ein grundlegender Baustein, um bereits bei der Produktgestaltung eine Kreislauffähigkeit herzustellen. Ziel des Produktgestaltungsprozesses ist eine bestmögliche Leistung des Produktes bei gleichzeitig minimalen negativen Auswirkungen auf die Umwelt während des gesamten Produktlebenszyklus. Dies impliziert Designgrundlagen wie Haltbarkeit, Modularisierung bzw. Standardisierung, einfache Wartungs- und Reparaturmöglichkeiten, Aufrüstbarkeit und Möglichkeiten zur vollständigen De- und Remontage, um z. B. eine zweite Nutzung des Produkts durch Updates oder Retrofits zu ermöglichen [14].

Verlängerung der Nutzungsdauer

Die längere Nutzungsdauer eines Produkts kann durch eine Erhöhung seiner Lebensdauer oder durch eine intensivere Nutzung während dieser Zeit erreicht werden. Eine Verlängerung der Lebensdauer kann dazu beitragen, dass die durch das Produkt verursachten Emissionen über einen längeren Zeitraum verteilt werden. Allerdings kann dies im Widerspruch zu Produktverbesserungen während der Nutzungsphase stehen, die eine geringere Umweltbelastung während der Nutzung zur Folge haben können. Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass die Reduktion von Emissionen durch ein optimiertes neues Produkt im Verhältnis zu den Umweltbelastungen durch eine Neubeschaffung stehen muss. Die Auslegung eines Produkts auf ein bestimmtes Leistungsniveau kann sich lohnen, damit eine möglichst optimale Auslastung erfolgt. Eine intensivere Nutzung kann zwar zu einer verkürzten Lebensdauer führen, aber auch die frühere Beschaffung eines verbesserten Produkts bedeuten. Die intensive Auslastung von Flugzeugen während der Lebensdauer oder das Sharing von Fahrzeugen sind Beispiele für optimierte Strategien bezüglich der Nutzungsdauer [16]. Entscheidend für einen solchen Ansatz ist das Vorhandensein von detaillierten Informationen zu den gefertigten Produkten, die bereits während der Produktentwicklung und Produktion aufgenommen werden müssen. Nur mit Hilfe einer soliden Datengrundlage kann eine emissionsoptimierte Nutzungsdauer ermittelt werden.

Um die Lebensdauer eines Produktes zu verlängern, gibt es unterschiedliche Ansätze. Zum einen kann das Produkt robuster ausgelegt werden. Hierbei ist der optimale Kompromiss zwischen höheren Emissionen bei der Herstellung und Einsparung durch längere oder intensivere Nutzung zu finden. Alternativ dazu kann mit Hilfe von Modularisierung und Standardisierung eine Reparatur oder ein Retrofit zu einer Verlängerung der Nutzungsdauer beitragen [16], [17]. Durch Predictive Maintenance können optimale Wartungsintervalle vorausgesagt werden und die Lebensdauer, z. B. von einem Werkzeug, verlängert sich [18]. Auch eine Verlagerung von Hardwarekomponenten wie z. B. Maschinensteuerungen in die Virtualität kann, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, durch eine bessere Updatefähigkeit zu einer längeren Lebensdauer führen.

Steigerung der Effizienz

Die Steigerung der Effizienz durch eine schlanke Produktion (Lean Production) und effiziente Prozesse stellt nicht nur aus wirtschaftlicher Betrachtung ein Ziel produzierender Unternehmen dar, sondern trägt auch zur Steigerung der Nachhaltigkeit bei [19]. Die Effizienz eines Produktionssystems hat direkte Auswirkungen auf die emittierten Emissionen bei der Herstellung von Produkten. Eine Reduzierung des Energieverbrauchs, das

Einsparen von Produktionsschritten, eine bedarfsgerechte Auslegung der Werkzeugmaschine oder die Vermeidung von Ausschuss während der Anlaufphase oder der Produktion führt letztendlich zu einer Verringerung des PCF. Die hierbei eingesparten Emissionen verbessern die Bilanzierung während der Herstellungsphase im Produktlebenszyklus. Auch digitale Technologien, wie die Nutzung von Daten, die Virtualisierung, die Nutzung des Industrial Metaverse oder KI, welche in Kapitel 3 vorgestellt werden, können große Effizienzpotenziale mit sich bringen.

3 Enabler für eine nachhaltige Produktion

Im vorangegangenen Kapitel wurde dargestellt, wie Nachhaltigkeit aus Sicht der Produktionstechnik definiert werden kann und welche Ansätze zur Umsetzung existieren. Dabei können einzelne Stationen im Lebenszyklus von Produktionssystemen optimiert, oder sogar Neue geschaffen werden, um Ausschuss zu vermeiden, Funktionen zu erweitern und den Lebenszyklus somit auszudehnen oder in einen Kreislauf zu überführen. Nachfolgend werden vier vielversprechende, digitale Technologien vorgestellt und ihr möglicher Einfluss auf die Nachhaltigkeit skizziert.

3.1 Digital Twin

Die Digitalisierung und Nachhaltigkeit stehen nicht im Widerspruch zueinander, vielmehr lassen sich erst durch digitale Lösungen Nachhaltigkeitsziele umsetzen. Erhobene Daten entlang der Wertschöpfungskette und des Produktlebenszyklus bieten im Hinblick auf eine nachhaltige und zirkuläre Produktion bisher ungenutzte Potenziale. Die Hebel zur nachhaltigen Produktion sind äquivalent zu Kernzielen der Digitalisierung im Kontext von Industrie 4.0, wie bspw. die Verbesserung der Produktivität (z. B. schnelle Neukonfiguration von Anlagen) und der effizienten Nutzung von Ressourcen (z. B. Vermeidung von Ausschuss) [20]. Die Digitalisierung ist somit ein übergreifender Lösungsbaustein für Unternehmen zur Entwicklung von Maßnahmen zur Minderung der Umweltauswirkungen. Digitale Technologien erfüllen dabei im Wesentlichen zwei Kernaufgaben: Erfassen und Befähigen. Mit Hilfe des Digital Twin kann z. B. datenbasiert ein PCF erfasst werden. Dieser dient der Vergleichbarkeit und Identifikation unternehmensinterner kritischer Prozesse. Zur Optimierung der Produktion hinsichtlich der Nachhaltigkeit, liefern die gewonnen und aufbereiteten Daten wichtige Erkenntnisse und können auf unterschiedlichen Ebenen entlang der Wertschöpfungskette zum Einsatz kommen (vgl. Abbildung 3).

Digital Twin in der Produktion

Bereits bei der Produktionsplanung lässt ein detaillierter Digital Twin der Produktionsanlagen eine realitätsnahe Simulation der Prozesse zu und kann in der Konzeptphase neuer Anlagen Aussagen zu optimierten Anlagenkonfigurationen oder zum Produktionslinien-design liefern [21].

Bei der Produktionssteuerung bieten die Digitalisierung und Vernetzung und die damit verbundene permanente und direkte Kommunikation zwischen Maschinen und Steuerungssystemen, die Möglichkeit zur Etablierung smarter und bedarfsorientierter Fertigungssysteme, welche eine zentrale Rolle in zukünftigen Produktionsstrategien einnehmen. Erst eine durchgängige, lieferkettenübergreifende Vernetzung ermöglicht eine Umsetzung der bedarfsorientierten Pull-Produktion, bei der die Produktionsmenge durch die Nachfrage bestimmt und eine Überproduktion vermieden wird [22], [23].

Die geschaffene Datengrundlage ermöglicht unterschiedliche Optimierungsstrategien auf der Shopfloor-Ebene. Mit Hilfe des Digital Twin und einem Verarbeitungsalgorithmus lassen sich Anomalien in der Produktion schneller erkennen und die Produktion von Fehlteilen wird früher gestoppt. Der Digital Twin einer Produktionsanlage ermöglicht eine virtuelle Inbetriebnahme und verkürzt die Anlaufphase zum Produktionsstart oder die Adaption optimierter Programmabläufe, wodurch der optimale Betriebspunkt früher erreicht und die Effizienz der Anlage gesteigert wird [21].

Digital Twin bis zum EOL

Das volle Potenzial einer durchgängigen Datenerfassung kann erst ausgeschöpft werden, wenn diese über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes hinweg erfolgt. Während jeder Phase des Lebenszyklus werden kritische Informationen generiert, die in die Entwicklung neuer Varianten oder Produktionskonzepte zurückgeführt werden können. So lässt sich beispielsweise durch einen Digital Twin, der Informationen aus der Nutzungsphase enthält, die Lebensdauer der Produkte verlängern, indem durch Vorhersagemodelle Wartungsintervalle adaptiv angepasst werden. Mit detaillierten Produktinformationen, von der Rohstoffgewinnung bis zum EOL, steigt die Realisierbarkeit von Kreislaufwirtschaft, da nachgelagerte Remanufacturing-, Recycling- oder Rethink-Prozesse einfacher durchgeführt werden können. Eine automatisierte Demontage kann deutlich effizienter durchgeführt werden, wenn einerseits die Daten aus der Montage verfügbar sind und genutzt werden können und andererseits bekannt ist, welche Ereignisse das Produkt in der Nutzungphase durchlaufen und welche Veränderungen es dabei möglicherweise erfahren hat. Darüber hinaus können Informationen über die verwendeten Materialien bei der Herstellung des Produktes bis zum EOL eine verbesserte Bewertbarkeit hinsichtlich des Recyclings ermöglichen [20].

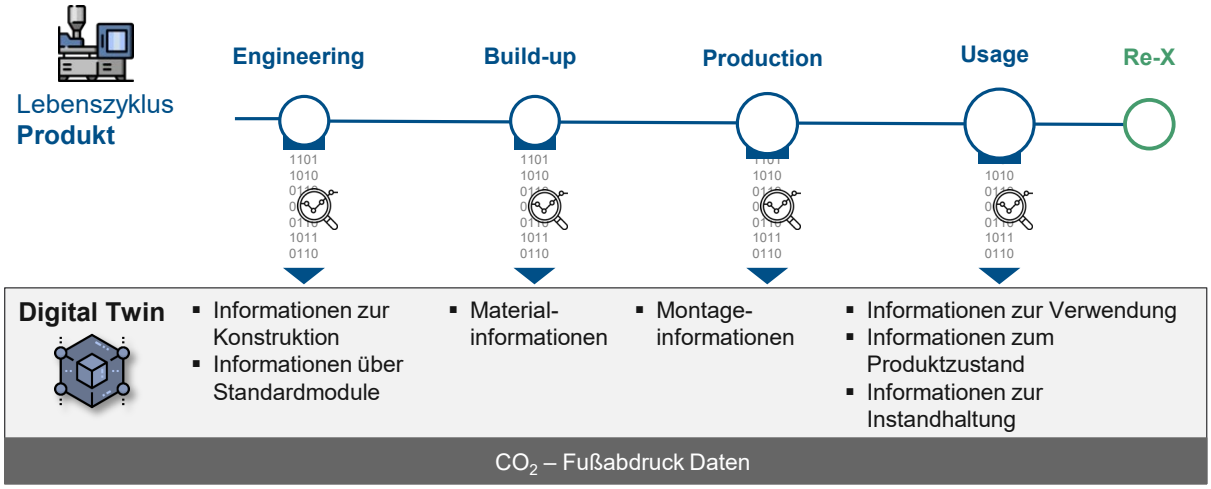


Abbildung 3: Anwendungsmöglichkeiten von digitalen Zwillingen

3.2 Virtualisierung

Auf den ersten Blick mag der direkte Zusammenhang von Virtualisierung und Nachhaltigkeit nicht offensichtlich sein, auch weil der Begriff in den unterschiedlichen Domänen sehr vielseitig verwendet wird. Dennoch ermöglicht diese Technologie Unternehmen, flexibel auf Nachfragen zu reagieren und Ressourcen bedarfsgerecht zu skalieren oder optimal auszulasten. In der Produktionstechnik bedeutet Virtualisierung oft die Abstraktion von Produktionsmitteln, Prozessen und Produkten, um digitale Modelle zur Entwicklung

und Optimierung zu nutzen [24]. Durch diese Anwendung kann beispielsweise Ausschuss, welcher normalerweise beim Einfahren und Testen von realen Prozessen anfallen würde, deutlich reduziert oder Maschinen optimal ausgelastet werden. In der Informationstechnik hingehen liegt der Fokus auf der Abstraktion von Ressourcen wie der Hardware, der Software oder dem Netzwerk. Je nach Art der zu virtualisierenden Ressource haben sich unterschiedliche Methoden etabliert, die eng mit den jeweiligen Zielen und Anforderungen korrelieren.

Klassische IT-Geschäftsmodelle

Die Konsolidierung mehrerer virtueller Server auf einer physischen Hardware gehört bereits seit vielen Jahren zum Standardvorgehen in der IT, um die vorhandene Hardware optimal auszulasten. Mittlerweile laufen viele dieser Anwendungen in Cloud-Umgebungen, die es ermöglichen, Ressourcen, wie CPU oder RAM, bei Bedarf (z. B. bei Lastspitzen) temporär zu erhöhen. Dies ermöglicht, eine bedarfsgerechte und effiziente Nutzung der vorhandenen Ressourcen. Aus diesem Grund streben immer mehr Unternehmen auch die Virtualisierung von Arbeitsplatzrechnern an. Dabei wird die physische Hardware durch einen energiesparenden Thin-Client ersetzt, der eine Verbindung zu einem Server herstellt, auf dem der zuvor lokal vorhandene Rechner in einer virtualisierten Umgebung läuft. Neben der vereinfachten, zentralen Verwaltung und Wartung des Systems können nun die benötigten Ressourcen ohne physischen Tausch der Hardware am Arbeitsplatz angepasst werden. Ein Praxisbeispiel zeigt das Einsparpotenzial in Bezug auf den Energieverbrauch: Durch die Konsolidierung von 8 Servern und die Installation von 40 Thin-Clients konnten die jährlichen Energiekosten eines Unternehmens um 35.000 KWh gesenkt werden [25].

Virtualisierung in der Produktion

Viele der im vorangegangenen Absatz vorgestellten Ansätze und Methoden aus dem IT-Bereich lassen sich auch auf die Produktion übertragen. Allerdings müssen dabei produktionsspezifische Anforderungen, wie die Echtzeitfähigkeit von Steuerungen und Kommunikationskanälen, berücksichtigt werden. Die Bedientafeln und Bildschirme an den Produktionslinien können oft durch energiesparende Thin-Clients ersetzt werden, während im Hintergrund ein vollwertiger Arbeitsplatzrechner läuft. Auch die Virtualisierung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) ist nicht mehr reiner Forschungsgegenstand, sondern wird unter anderem von Unternehmen wie Bosch Rexroth, Codesys und Siemens angeboten. Durch die Konsolidierung mehrerer SPS auf einer Hardware können Leistungen basierend auf den Anforderungen flexibel skaliert werden. So kann die Leistung ohne Tausch der Hardware auf Knopfdruck verdoppelt werden, wenn beispielsweise ein “leistungshungriges” KI-Modell auf der Steuerung laufen soll. Darüber hinaus bietet die Virtualisierung Vorteile hinsichtlich der Wartung, dem Aufspielen von Updates und der Sicherheit der Steuerung. Aufgrund der Tatsache, dass keine physische Hardware mehr vorliegt, die veraltet und entsprechend ausgetauscht werden muss, kann die Nutzungsdauer von Maschinen erheblich verlängert werden. Dabei steht jedoch nicht immer nur die reine Hardware im Fokus. Häufig muss diese auch in Kombination mit dem Netzwerk betrachtet werden. Unternehmen wie z. B. Cisco und Audi arbeiten daran, echtzeitfähige Netzwerke, beispielsweise auf Basis von Profinet, zu virtualisieren [26]. Aufgrund der zunehmenden Digitalisierung und dem Einsatz von IT-Systemen in der Produktion kann die Virtualisierung in allen Lebenszyklusphasen einen positiven Einfluss haben, wie in Abbildung 4 zusammenfassend dargestellt wird.

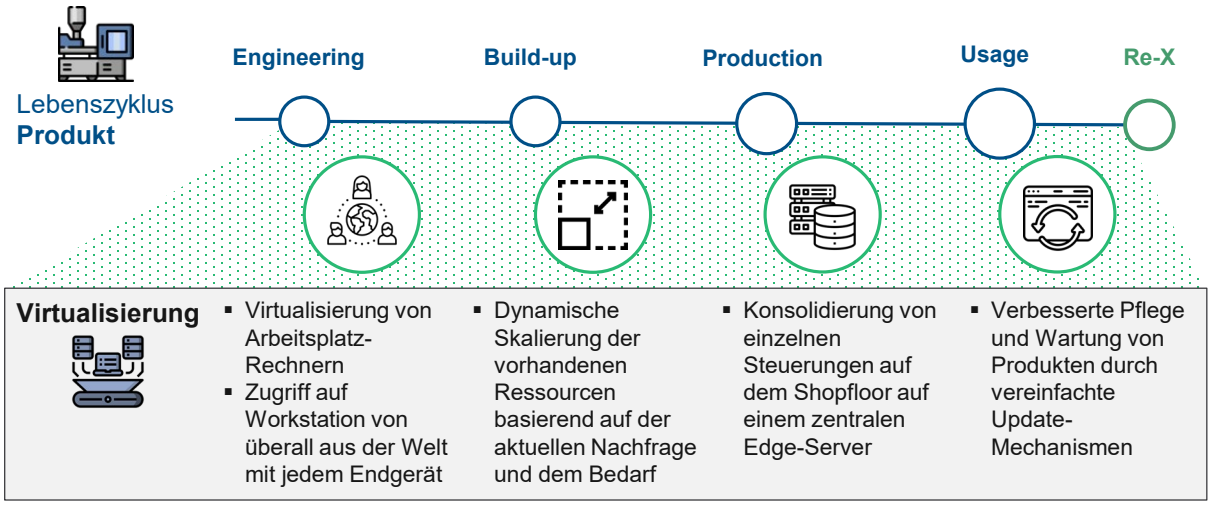


Abbildung 4: Anwendungsmöglichkeiten und Potenziale von Virtualisierung

3.3 Industrial Metaverse

Der weitgefasste Begriff “Metaverse” beschreibt im Kern eine Umgebung, in der die physische und digitale Welt miteinander verschmelzen [27]. Durch den konvergenten Einsatz von Mixed-Reality-Technologien wird im Metaverse die multisensorische, dynamische Interaktion mit virtuellen 3D-Umgebungen, digitalen Objekten und Menschen in Echtzeit ermöglicht [28]. Das Metaverse wird allgemein in zwei Bereiche unterteilt, in denen sich unterschiedliche Potenziale für die Nutzung ergeben: Während im *Consumer Metaverse* vor allem die Weiterentwicklung von sozialer Interaktion, Events und Spielen im Fokus steht, existieren im *Industrial Metaverse* vielfältige Möglichkeiten zur innovativen Gestaltung von Domänen wie dem Gesundheitswesen, dem Bildungssektor und der Industrie [29]. Aus Sicht der Produktionstechnik ergeben sich aktuell drei Hauptanwendungsfelder.

Neue Möglichkeiten der Mitarbeiterqualifikation schaffen

Das Metaverse bietet den Mitarbeitenden mehr Möglichkeiten, neue Umgebungen, Abläufe und Maschinen kennenzulernen [30]. Dabei ist es aufgrund der virtuellen Umgebung möglich, die Personen kontrolliert und wiederholbar in Gefahrensituationen zu versetzen, damit sie den entsprechenden Umgang erlernen können. So lässt sich beispielsweise zeigen, was passiert, wenn eine Werkzeugmaschine falsch bedient und ein Crash gefahren wird - ganz ohne Material- oder Personenschaden. Zusätzlich bietet diese Art des Lernens eine gewisse Skalierbarkeit: Obwohl nur eine Maschine in der Realität vorhanden sein kann, können in der virtuellen Umgebung beliebig viele Mitarbeitende den Umgang erlernen. Um die Erfahrung im Metaverse und die Erfahrung in der Realität anzunähern, bedarf es jedoch weiterer Forschungsarbeiten hinsichtlich der Steigerung der Immersion. Insbesondere haptisches Feedback wird in Zukunft dabei eine große Rolle spielen.

Verbesserung des Engineeringprozesses

Im Engineeringprozess werden seit Jahren CAx-Tools eingesetzt, um mittels 3D-Visualisierung die Ausgestaltung der Assets zu unterstützen. In der Vision des Metaverse soll diese Unterstützung völlig neue Dimensionen erreichen: Entwickler können Produkte nun nicht mehr nur gestalten, sondern mittels Mixed-Reality-Technologien auch

in der zugehörigen Umgebung aus neuen Blickwinkeln betrachten und bei entsprechender Kinematisierung und Simulation deren Funktionalitäten prüfen. So lassen sich beispielsweise einzelne Arbeitsplätze und sogar ganze Fabriken gestalten und im virtuellen Raum validieren, bevor sie gebaut werden. Erste Schritte zur Realisierung dieser Vision wurden unter anderem bereits von einigen Automobilisten gemacht [31], [32].

Neben der 3D-Visualisierung ist auch ein Austausch verschiedener Akteure in Echtzeit eine Zielvorstellung, welche die Produktivität signifikant steigern kann: In den etablierten Workflows müssen Daten aus verschiedenen Tools meist händisch zusammengefügt und angepasst werden. Aktuell verfügbare Plattformen zur Implementierung des Industrial Metaverse versprechen diese Grenzen aufzubrechen, um ein transparenteres Arbeiten ohne Schnittstellenverluste und Kompatibilitätsprobleme zu realisieren [31], [33].

Generierung synthetischer Daten

Der Einsatz von Computer Vision wird in der produzierenden Industrie immer allgegenwärtiger. Neben der Nutzung für die Qualitätskontrolle von Bauteilen [34] kann sie in Kombination mit Robotik die automatisierte Handhabung von Objekten deutlich verbessern [35]. Unabhängig vom Anwendungsfall werden für das Training der benötigten Machine Learning Algorithmen jedoch große, gelabelte Datensätze benötigt, die oftmals nicht verfügbar oder nur mühsam und zeitaufwendig zu beschaffen sind [34]. Das Industrial Metaverse bietet dafür eine Lösung: Mittels fotorealistischen Renderings der 3D-Umgebungen und Objekte und der Möglichkeit, Beleuchtung, Objektposen und Umgebung flexibel anzupassen, lassen sich synthetische Bilder bzw. Daten für das Training schnell, einfach und sogar automatisiert erstellen und labeln [33]. Somit können Produktionssysteme befähigt werden, bereits ab der ersten Inbetriebnahme fehlerfreier und somit nachhaltiger zu funktionieren.

Die potenziellen Einflüsse des Metaverse auf die verschiedenen Stationen im Lebenszyklus eines Produktes sind in Abbildung 5 zusammengefasst.

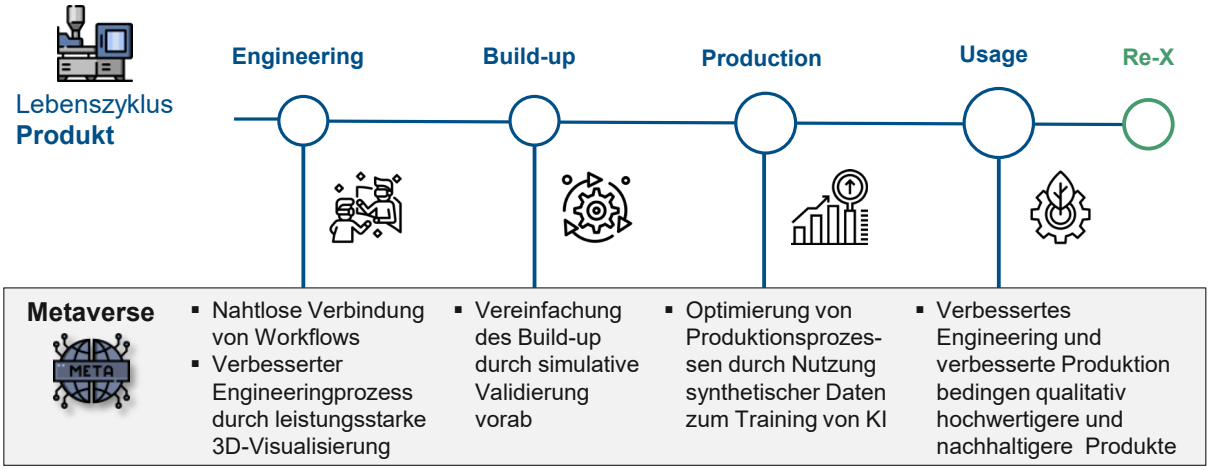


Abbildung 5: Anwendungsmöglichkeiten des Metaverse

3.4 Künstliche Intelligenz für die Produktionstechnik

Die Anwendung von KI entlang des gesamten Produktlebenszyklus bietet Unternehmen zahlreiche Ansatzpunkte für Effizienzsteigerungen und kann zur Optimierung von Nachhaltigkeit und Lebensdauer von Produkten beitragen. Durch den Einsatz von KI-Systemen können Produkte so entwickelt werden, dass ihre Nutzungsdauer verlängert und

gleichzeitig der Ressourcenverbrauch reduziert wird. In der Produktion können KI-Systeme dazu beitragen, den Energieverbrauch zu reduzieren und die Produktion von Ausschuss zu minimieren. Dadurch können Unternehmen nicht nur ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern, sondern auch einen Beitrag zur Schonung von Ressourcen und zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks leisten.

Qualitäts- und Produktivitätssteigerungen

KI bietet in der Produktion ein großes Potenzial zur Steigerung von Produktivität und Qualität bei gleichzeitiger Reduktion der Kosten. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Analyse großer Mengen an Echtzeitdaten, um Anomalien und Muster zu erkennen, gezielt Erkenntnisse zu gewinnen und Maßnahmen abzuleiten [36].

Predictive Maintenance ist eine beispielhafte Anwendung von KI in der Produktion, bei der mittels Datenanalysen der Zustand von Maschinen und Anlagen überwacht wird, um frühzeitig Anomalien und Abweichungen zu erkennen und Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen einzuleiten. Dadurch können ungeplante Ausfallzeiten minimiert, die Nutzungsdauer von Maschinen verlängert und die Produktion von Fehlteilen reduziert werden. Beispielweise kann eine KI-basierte Werkzeugverschleißbestimmung zur Steigerung des Ausnutzungsgrades beitragen. Eine weitere Anwendung ist Predictive Quality, bei der die Qualität von Produkten während des Herstellungsprozesses durch Echtzeitdatenanalyse überwacht wird, um schnell auf Fehler oder Probleme reagieren zu können. Darüber hinaus kann KI-basiert der Betriebspunkt einer Maschine kontinuierlich, prozessparallel und entsprechend des vorliegenden Kontextes optimiert werden, indem die optimalen Maschinenparameter durch Datenanalyse und Prozessoptimierungsmodelle ermittelt werden.

Generative Künstliche Intelligenz

Generative Künstliche Intelligenz ist ein Teilbereich der KI, in dem zuvor auf großen Datenmengen trainierte Modelle eigenständig neue Inhalte generieren können, etwa zur Nutzung in Anwendungsfällen, für die noch keine realen Daten vorliegen. Die Technologie findet in vielen Bereichen Anwendung, wie der synthetischen Bilderzeugung, der Textgenerierung und der automatischen Modellierung von 3D-Objekten. In der Produktentwicklung können generative Algorithmen dazu verwendet werden, um die Konstruktion sowie dessen Topologie hinsichtlich gewählter Zielgrößen zu optimieren. Diese können beispielweise ein möglichst geringes Gewicht unter Gewährleistung der Funktionalität oder die Reduktion des benötigten Eingangs von Rohmaterial und Energie in der Produktion sein [37]. Im Rahmen der anschließenden Inbetriebnahme von Produktionsprozessen können, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, synthetische Bilddaten dazu genutzt werden, um Computer Vision Modelle zu trainieren. Außerdem können Maschinen, wie etwa Roboter, durch die generative Erzeugung von Simulationsszenarien autonom programmiert und parametriert werden [38]. Besonders hier werden die Synergien zwischen den Ansätzen des Industrial Metaverse und dem Einsatz von generativer KI deutlich. Durch die Nutzung von synthetischen Daten verschiebt sich die wirtschaftliche Nutzbarkeit von KI in Richtung kleinerer Losgrößen, da keine realen Daten benötigt werden. Darüber hinaus können generative Algorithmen, deren Training auf Engineering- und Produktionsinformationen basiert, dazu genutzt werden, Inhalte für Informations- und Werkerassistenzsysteme zu generieren. Dies kann vor allem bei ungeschultem Personal im Hinblick auf den strukturellen und demographischen Wandel große Mehrwerte liefern. Trotz der zahlreichen Potenziale von generativer KI besteht die große Herausforderung darin, den Domain Gap zu überwinden und sicherzustellen, dass generierte Inhalte auch zu robusten

Lösungen führen, die dem Einsatz in der Realität standhalten [39]. Hier wird an zahlreichen Lösungsansätzen wie etwa der Domain Randomization geforscht.

Menschliche und Künstliche Intelligenz im Zusammenspiel

Es existieren zahlreiche Anwendungsfälle und Szenarien, in denen KI-Systeme zwar einen Mehrwert im Sinne der Erkenntnisgewinnung aus Daten mit sich bringen, eine autonome Anwendung dieser Erkenntnisse etwa in Form einer automatisierten Anpassung von Maschinenparametern jedoch nicht sinnvoll ist. Beispiele hierfür sind der Zeitraum, in dem die KI antrainiert wird und dementsprechend noch nicht performant ist, oder wenn Prozessschritte betrachtet werden, bei denen der Einsatz von KI-Modellen nicht ausreichend robust und nachvollziehbar ist. Bei Produkten mit geringer Stückzahl und hoher Variantenvielfalt könnte dieser Zustand gegebenenfalls niemals überwunden werden. Um die Potenziale von KI dennoch auszuschöpfen, lässt sich in solchen Fällen ein System mit hybrider Intelligenz nutzen, in dem menschliche und künstliche Intelligenz bidirektional interagieren [40]. Die KI kann durch gezielte Eingaben von Experten effizienter trainiert werden, wodurch sie wiederum in menschzentrierten Applikationen [41] über Assistenzsysteme Analysen und Handlungsempfehlungen zurückspielen kann. In Abbildung 6 werden die beschriebenen Nachhaltigkeitspotenziale der genannten KI-Ansätze entlang des Lebenszyklus eines Produkts zusammengefasst.

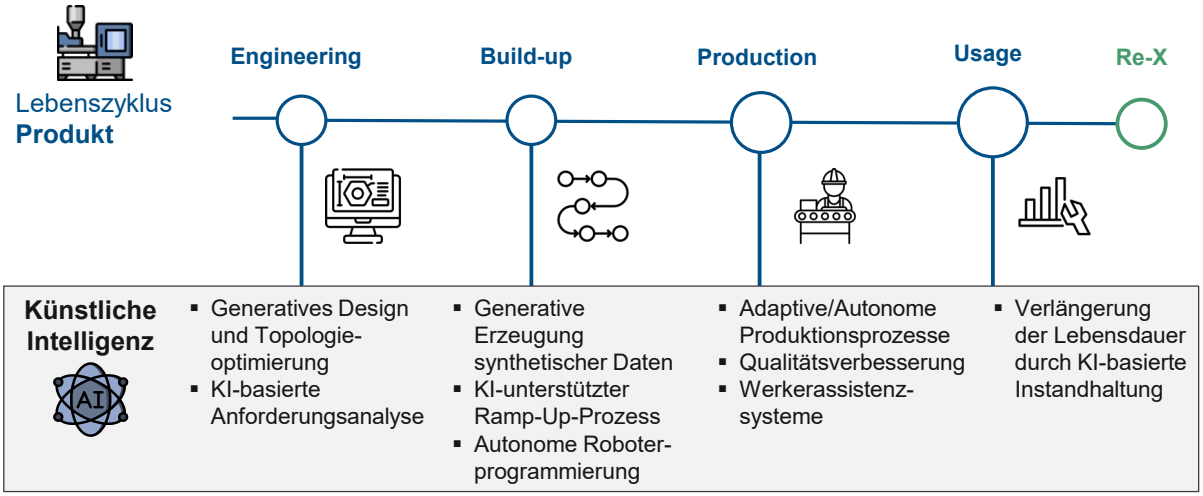


Abbildung 6: Anwendungsmöglichkeiten von Künstlicher Intelligenz für die Produktionstechnik

4 Sustainable Production-as-a-Service

Im vorherigen Kapitel wurden digitale Technologien wie digitale Zwillinge, Virtualisierung, Metaverse und KI als Enabler für eine nachhaltige Produktion genannt. Obwohl diese Technologien bereits allgemein, wenn auch in variierendem Reifegrad, verfügbar sind, existieren immer noch zahlreiche Herausforderungen, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen, welche sie daran hindern, diese scheinbar greifbaren Lösungen zu nutzen. Die Eintrittsbarriere scheint trotz des hohen Angebots aus Kundensicht zu hoch, da es vielfach an Expertise in den Technologien fehlt und hohe anfängliche Investitionskosten bestehen. Die Zurückhaltung ist verständlich, da die Rentabilität der Technologie oftmals ungewiss ist. Gleichzeitig bedingen die teils schwankende Kundennachfrage sowie instabile Lieferketten und damit einhergehende Produktionsausfälle große Unsicher-

heiten, denen langfristige Investitionen entgegenstehen. As-a-Service-basierte Geschäftsmodelle können diese finanzielle und wissensbasierte Barriere senken und dem Kunden potenziell breiteren Zugang zu digitalen Technologien geben. Dies beeinträchtigt nicht die Kundenerwartungen, da sie mehr auf Ergebnisse, Personalisierung und kontinuierliche Verbesserung, als auf Eigentum und Generalisierung bedacht sind [42].

4.1 As-a-Service im digitalen Zeitalter

As-a-Service bietet zwei Arten von Verträgen an: flexibel und leistungsbasiert [43]. Bei der flexiblen Vertragsart geht es darum, Einnahmen- und Ausgabenströme zu synchronisieren, die mit der variablen Nutzung des Produkts einhergehen. Bei der leistungsorientierten Vertragsart hingegen wird das Wertversprechen an den Auswirkungen des Produkts gemessen, z. B. einer Produktivitätssteigerung oder einer Reduktion der gesamten Kosten des Eigentums (Total Cost of Ownership – TCO). Im Gegensatz dazu liegt das Wertversprechen bei einem reinen Produktangebot in der Übergabe des physischen Produktes und der versprochenen Merkmale, ohne eine Verantwortung über die Erfüllung der Kundenerwartungen zu übernehmen. Bei aaS findet eine Verschiebung von einem abstrakten Marketingversprechen hin zu einem Leistungsversprechen statt. Die Eigentumsstruktur unterscheidet sich ebenfalls, da der Kunde lediglich temporäre Nutzungsrechte an dem Produkt erhält und somit als Mieter gilt.

Subskriptionsmodelle

Subskription und „Pay-per-X“ sind gängige Erlösmodelle zur Monetarisierung von aaS [43]. Subskriptionsmodelle generieren wiederkehrende und stabile Einnahmen (z. B. monatlich oder jährlich), die durch Upgrades flexibel erweitert werden können. Die daraus resultierende Kundenbindung ist jedoch jederzeit kündbar. Bei Pay-per-X bezahlt der Kunde nur die tatsächlich verbrauchte oder produzierte Leistung (z. B. Pay-per-Hour oder Pay-per-Part). Häufig werden Pay-per-X-Modelle mit Subskriptionsmodellen kombiniert, um mögliche Risiken wie den Wertverluste älterer Maschinen abzufedern. Hierbei verkauft der Anbieter die Funktion des Produktes für eine definierte Nutzungszeit über modifizierte Vertriebs- und Zahlungssysteme wie Subskription, Sharing, Pooling oder Leasing [44].

Everything-as-a-Service

Die Vielfalt von möglichen Services ist unbegrenzt: von Software (Software-as-a-Service), über Rechnerinfrastruktur (Infrastructure-as-a-Service) bis hin zu Anlagen und Maschinen (Equipment-as-a-Service) können alle Arten von Assets und Dienstleistungen als Services angeboten werden [45]. Der Ausdruck für diesen Ansatz lautet Everything-as-a-Service (XaaS).

Bei Software-as-a-Service (SaaS) wird die Nutzung einer Software als Dienstleistung vermietet, anstatt die Software als Lizenz zu verkaufen [46]. Dies bietet dem Kunden Vorteile hinsichtlich Produkt-Support und -Updates, welche automatisch bereitgestellt werden können. Infrastructure-as-a-Service (IaaS) ermöglicht es, Rechnerinfrastruktur bei Bedarf zu mieten, was es Unternehmen ermöglicht, einmalige Anwendungen zu realisieren und Belastungsspitzen abzufangen. Die kontinuierliche Überwachung, Wartung und Reparatur ist ebenfalls Teil des Service, um die Anlagen und Maschinen in einem optimalen Betriebszustand zu halten.

Von Datenintegration zu Smart Services

Ein entscheidender Faktor zur Maximierung des Erfolgs von aaS-Modellen ist die Nutzung von Daten. Beim Equipment-as-a-Service (EaaS) können durch datentechnische Integration und Kommunikation zwischen Anlagennutzer und dem aaS-Anbieter wichtige Produktionsdaten gesammelt und ausgewertet werden. Dadurch kann der Ressourcen- und Energieverbrauch optimiert, das Anlagenrisiko miniert und die Lebensdauer der Anlage im Sinne der Nachhaltigkeit maximiert werden. Durchgängige IT-Systeme sind notwendig, um eine kontinuierliche Datenrückführung und -analyse zu ermöglichen. Darüber hinaus werden entsprechende Kompetenzen und Methoden zur Analyse der gesammel-ten Daten benötigt, um die Kundenbedürfnisse besser zu verstehen. Eine enge Einbin-dung des Kunden durch einen partizipativen Ansatz ist somit unerlässlich. Die Datenauf-nahme eröffnet außerdem Möglichkeiten für datenbasierte digitale Dienstleistungsange-bote, wie den Einsatz künstlicher Intelligenz oder die Erstellung und Nutzung digitaler Zwillinge. Diese Dienstleistungen werden auch Smart Services genannt. In Kombination mit der passenden Sensorik am Produkt können Daten aufgenommen und über private sowie öffentliche Kommunikationswege weitergegeben werden. Dadurch wird das Unter-nehmen idealerweise nicht nur zum Serviceanbieter, sondern Erbringer einer digitalen Lösung [42]. Neue Geschäftsbereiche können erschlossen werden, wobei die Analyse von Marktdaten richtungsweisend ist.

4.2 As-a-Service als Enabler für eine nachhaltige Produktion

AaS bietet nicht nur eine Möglichkeit der wachsenden Dynamik und Komplexität der Märkte zu begegnen, sondern birgt auch erhebliches Potenzial, um die Nachhaltigkeitsziele zu erreichen. Insbesondere SDG 12 (Verantwortungsvoller Konsum und Produktion) und SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz) profitieren von aaS-Modellen, da diese vor allem auf Ressourcenschonung abzielen und eine möglichst lange Lebensdauer der Pro-dukte im Wirtschaftskreislauf anstreben [47]. Weiterhin führen alternative Vertriebssys-teme wie das Sharing zu einer höheren Auslastung der Produkte und Produktionsstätten, wodurch sowohl in der Produktion als auch im Konsum positive Auswirkungen entstehen. Darüber hinaus fördert XaaS Faktoren wie Innovation und Infrastruktur, welche positive Effekte auf die Gesellschaft haben können.

Equipment-as-a-Service

SYSTEMIQ ist ein Unternehmen für Systemwechsel, welches sich für den Wandel zu einem nachhaltigen Wirtschaftssystem einsetzt [43], [47]. Gemeinsam mit dem Maschinenhersteller Trumpf hat das Unternehmen eine quantitative Analyse der Nachhaltigkeitspotenziale einer auf aaS-basierten Laserschneidmaschine durchgeführt. Dabei wurden das Dekarbonisierungspotenzial und die Reduktion des TCO mit Hilfe von zwei EaaS-Szenarios analysiert: In EaaS 1.0 wurde ein Pay-per-Part Geschäftsmodell betrachtet, das bereits verfügbar ist. Durch die Verwendung von KI-basierter Prozessoptimierung oder Over-the-Air-Updates können weitere Potenziale gehoben werden. In EaaS 2.0 wurde dieses Modell durch einen digitalen Marktplatz erweitert, um die Kundennach-fragen zu bündeln und den Maschinen- und Materialfluss zu optimieren. Diese beiden Ansätze besitzen das Potenzial die Metallblechherstellung um 37% bzw. 65% zu dekar-bonisieren und dem Kunden darüber hinaus eine Reduktion des TCO von 16% bzw. 24%

zu ermöglichen (siehe Abbildung 7). Haupteinfluss war die Optimierung beim Materialverschnitt, dies fordert neue Wege hin zu digitalen Beschaffungsprozessen mit höheren Freiheiten der Auftragsvergabe und -zerlegung.

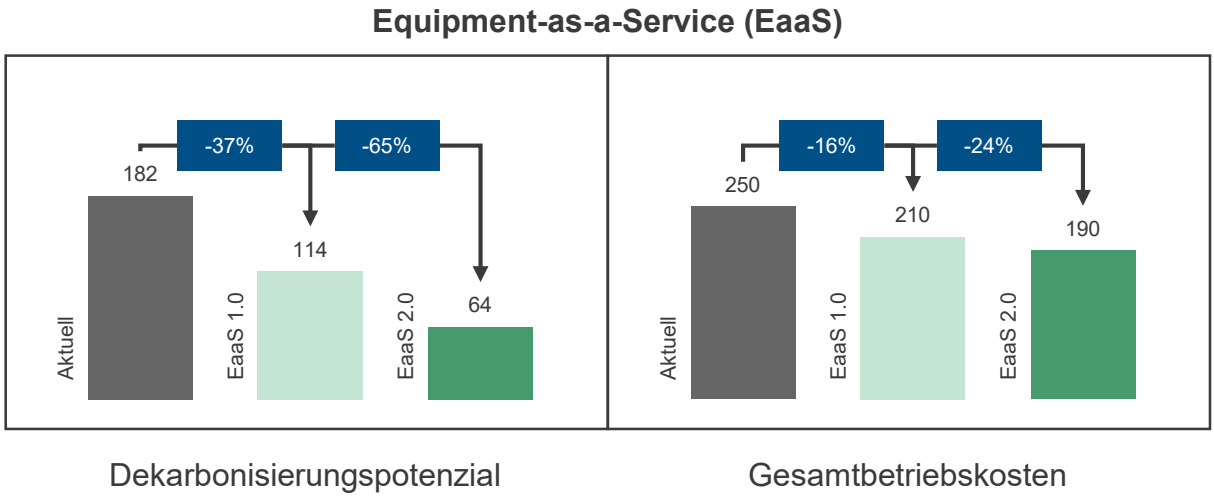


Abbildung 7: Nachhaltigkeitspotenziale durch Equipment-as-a-Service. Quelle: SYSTEMIQ/Trumpf

Bei aaS-Modellen behalten Unternehmen das Eigentumsrecht über ihr Produkt sowie die Verantwortung über dessen Lebenszyklus. Dadurch werden sie motiviert, zirkuläre Geschäftsmodelle anzustreben. Die Transformation zu einem aaS-Geschäftsmodell bedingt ein zirkuläres Produktdesign sowie Betriebsmodell. Dies bedeutet, dass ein Produkt für eine lange Lebensdauer und -qualität designt und entwickelt werden muss. Durch die Kombination der vorgestellten digitalen Technologien und der aaS-Modelle lässt sich das Konzept der Sustainable Production-as-a-Service realisieren. In Abbildung 8 sind die Bestandteile dieses Ansatzes zusammenfassend dargestellt.

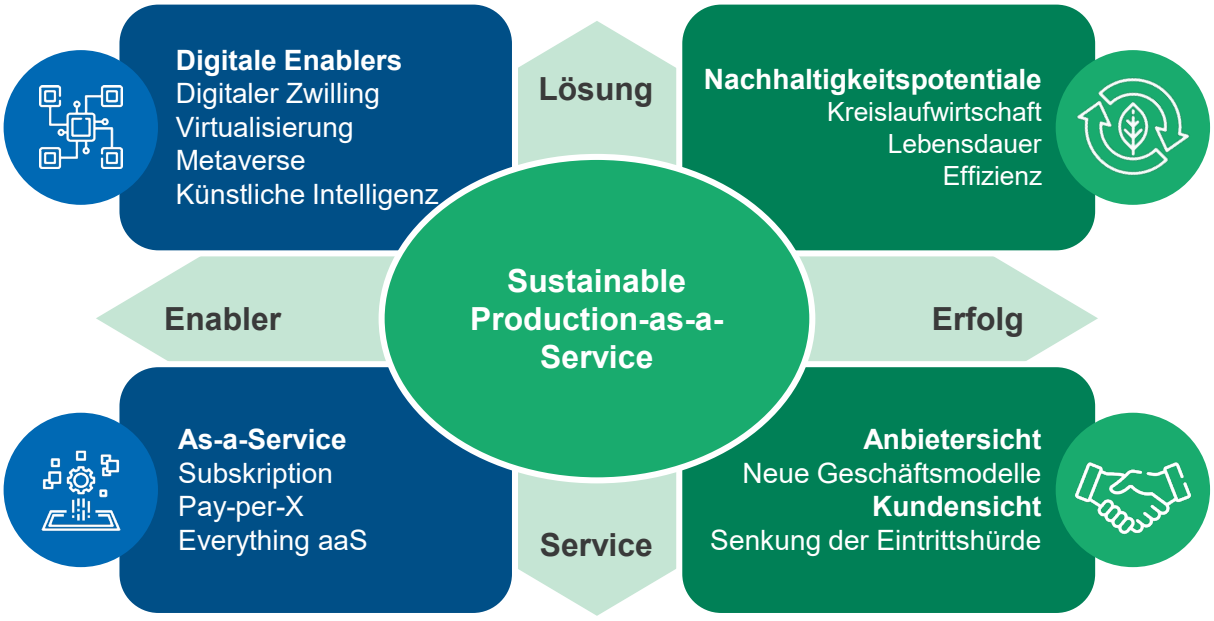


Abbildung 8: Sustainable Production-as-a-Service

5 Beispiele aus der Industrie und Forschung

Aus den vorherigen Kapiteln geht hervor, dass der Einsatz von digitalen Technologien und die Nutzung von as-a-Service-Angeboten Enabler für eine nachhaltige Produktion sein können. Anhand von mehreren Beispielen sollen in diesem Kapital die zuvor erläuterten, teils konzeptionellen Ansätze konkreten Erfolgsgeschichten aus der Industrie und Forschung gegenübergestellt werden. So wird in dem Forschungsprojekt Autopilot (BMBF, FKZ: 02J21E000) untersucht, wie durch den Einsatz von wandlungsfähigen Fertigungszellen und kreislauffähigen Betriebsmitteln die (Fahrzeug-)Produktion nachhaltiger gestaltet werden kann. Hierbei wird insbesondere die Ausgestaltung des Geschäftsmodells Equipment-as-a-Service am Beispiel von Landungsträger aus Holz (Kapitel 5.1) und modularen Spannvorrichtungen (Kapitel 5.2) betrachtet. Das Forschungsprojekt ViRTNC (BMWK, IGF-Vorhaben: 22716 N/2) hingehen zeigt die Potenziale der Virtualisierung am Beispiel von NC-Steuerungen auf (Kapitel 5.3). Darüber hinaus werden die Potenziale des Industrial Metaverse anhand eines Beispiels aus der Industrie präsentiert (Kapitel 5.4). Abschließend zeigt ein Anwendungsbeispiel aus dem Forschungsprojekt GeMeKI (BMBF, FKZ: 02P20A121) die Chancen Hybrider Intelligenz in der Endmontage auf (Kapitel 5.5).

5.1 Ladungsträger-as-a-Service

Das Start-up Ligenium aus Chemnitz ist eine Ausgründung der TU Chemnitz und bietet digitale und klimaneutrale Logistiklösungen auf Basis von Holzwerkstoffen an. Besonders hervorzuheben ist der Ladungsträger, der im Vergleich zu Stahlkonstruktionen eine Einsparung von 50% Tara bei gleichbleibender Belastbarkeit und größerem Ladungsvolumen ermöglicht. Dank der modularen Steckverbindungsbauweise werden ein geringes Eigengewicht und Zwischenlagervolumen und eine hohe Wiederverwendbarkeit gewährleistet. Die hölzernen Ladungsträger zeichnen sich durch ein klimaneutrales Recycling aus, da Holz CO_2 bindet und nachweislich die CO_2-Bilanz verbessert. Die höhere Beständigkeit von Holz unter chemischen und aggressiven Umgebungsbedingungen im Vergleich zu Metallkonstruktionen ermöglicht eine Ausdehnung des Lebenszyklus. Durch die besondere Wartungsarmut und intralogistische Belastbarkeit sind die Ladungsträger aus Holzwerkstoffen eine umweltfreundliche und langlebige Alternative.

Anhand dieses Beispiels zeigt sich bereits, dass im Engineering das Thema Nachhaltigkeit eine entscheidende Rolle spielt. Die Wahl von alternativen Werkstoffen kann sich direkt positiv auf den CO_2-Footprint auswirken und die modulare Bauweise erleichtert die Reparaturfähigkeit und führt dadurch zu einer verlängerten Nutzung. Dies bietet eine optimale Ausgangslage für neue Geschäftsmodelle, wie Equipment-as-a-Sevice bzw. in diesem Fall Ladungsträger-as-a-Service. Der Kunde zahlt für das Betriebsmittel nur so lange, wie er dieses auch aktiv in der Produktion nutzt. Wenn das Betriebsmittel nicht mehr benötigt wird, geht es zurück an den Hersteller. Dieser muss anschließend auf Basis der bisherigen Nutzung des Betriebsmittels entscheiden, welche R-Strategie (vergleiche Kapitel 2.2) die Beste ist, um das Betriebsmittel im Sinne der Kreislaufwirtschaft optimal weiter zu nutzen. Aus Anbietersicht ist es erstrebenswert, Betriebsmittel mit möglichst geringem Aufwand und Anpassungen häufig weiter zu vermieten. Dazu müssen alle relevanten Daten über die verschiedenen Lebenszyklen hinweg erfasst und als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung gestellt werden. Hierfür benötigt der Ladungsträger Sensorik, die die Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie Belastungen kontinuierlich erfassen. Eine zuverlässige Konnektivität ist dabei insbesondere

bei mobilen Betriebsmitteln von großer Bedeutung, um die benötigte Datendurchgängigkeit zu gewährleisten.

5.2 Spannvorrichtung-as-a-Service

Die EDAG Group ist weltweit der größte unabhängige Engineering-Partner der Mobilitätsindustrie. Sie übernimmt die Strategieentwicklung über die Konzeptphase und Serie bis hin zur Produktionsplanung und -optimierung für Fahrzeuge und Produktionsanlagen. Innerhalb der EDAG Group unterstützt die EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG bei der Umsetzung von Smart Factories und hat unter anderem den UniSerienStandard® entwickelt.

Dieser Betriebsmittelstandard umfasst flexible Vorrichtungen, die ein schnelles und wiederholgenaues Fügen von Werkstücken ermöglichen. Besonders hervorzuheben ist der modulare Aufbau des Betriebsmittelstandards und die zeichnungslose Fertigung nach 3D-CAD-Daten. Der modulare Aufbau ermöglicht eine hohe Flexibilität, kurze Lieferzeiten (ca. 35% schneller gegenüber OEM-Serie) sowie geringe Kosten (ca. 32% günstiger als OEM-Serie). Gleichzeitig kann eine Verringerung der Masse um ca. 40% bei verbesserter Festigkeit erreicht werden, was eine signifikante Reduktion des CO_2-Fußabdrucks bedingt. Die Vorrichtungskomponenten bestehen größtenteils aus Standardteilen, wodurch eine hohe Wiederverwendbarkeit in Folgeprojekten gegeben ist. Das Design des UniSerienStandard® reduziert die Anzahl benötigter Individualteile und der modulare Aufbau begünstigt die Reparatur und das Recycling der Spannvorrichtung. Diese hohe Modularität ist vor allem für den Prototypenbau von Vorteil. Die Weiterentwicklung eines elektro-pneumatischen Aufbaus reduziert die Anzahl von Verdrahtungsschemata und reduziert somit zusätzlich den Carbon Footprint. Dadurch ist auch eine Aufnahme von Nutzungsdaten möglich, um die Nutzungshistorie der Spannvorrichtung zu verfolgen. Dies ist für die Wiederverwendbarkeit von Vorteil, da eine Vorhersage über die Lebensdauer getroffen werden kann.

Auch hier zeigt sich, dass das modulare Design der Spannvorrichtung ein entscheidender Enabler ist. Viele Unternehmen vermeiden bisher auf Grund des erhöhten Aufwands und den daraus resultierenden Kosten dieses Vorgehen im Engineering. Da die Betriebsmittel aber im Besitz des Anbieters bleiben und sich über die Lebenszeit mehrmals ändern, lohnt sich der initiale Aufwand über die gesamte Lebenszeit betrachtet. Zusätzlich bietet die Modularisierung den Vorteil, dass sich der Konstruktionsprozess teilweise automatisieren lässt, was sich positiv auf die Lieferzeit und damit auf die Zufriedenheit des Kunden auswirkt. Durch die Rückführung von Daten ins Engineering kann auch eine Verbesserung der Betriebsmittel selbst vorgenommen werden.

In den vorangegangenen Abschnitten wurden insbesondere die technischen Herausforderungen bei der Gestaltung des Geschäftsmodells behandelt. Diese Herausforderungen sind teilweise auch auf organisatorische Faktoren zurückzuführen. Firmeninterne Richtlinien und Standards können beispielsweise ein erhebliches Hindernis darstellen, da sie nicht branchenweit anerkannt sind und somit möglicherweise nicht den Standards anderer Nutzer entsprechen. Dadurch kann die Wiederverwendung trotz gleicher Funktion eingeschränkt sein. Daher bleibt zu klären, ob Nutzer bereit sind, von ihren eigenen Standards abzuweichen, um von den Vorteilen einer Reduzierung der Betriebsmittelaufwände und einer nachhaltigeren Nutzung zu profitieren, oder wie Betriebsmittel flexibel gestaltet werden können, ohne dabei bestehende Standards zu beeinträchtigen. Aktuell können die Vorrichtungen nur geleast werden. Dieses Modell kann allerdings zu einem EaaS-

Modell erweitert werden, um die im vorangegangenen Kapitel genannten Vorteile zu bergen. Abbildung 9 fasst die Vorteile von EaaS am Beispiel von ligenium und EDAG PS noch einmal zusammen.

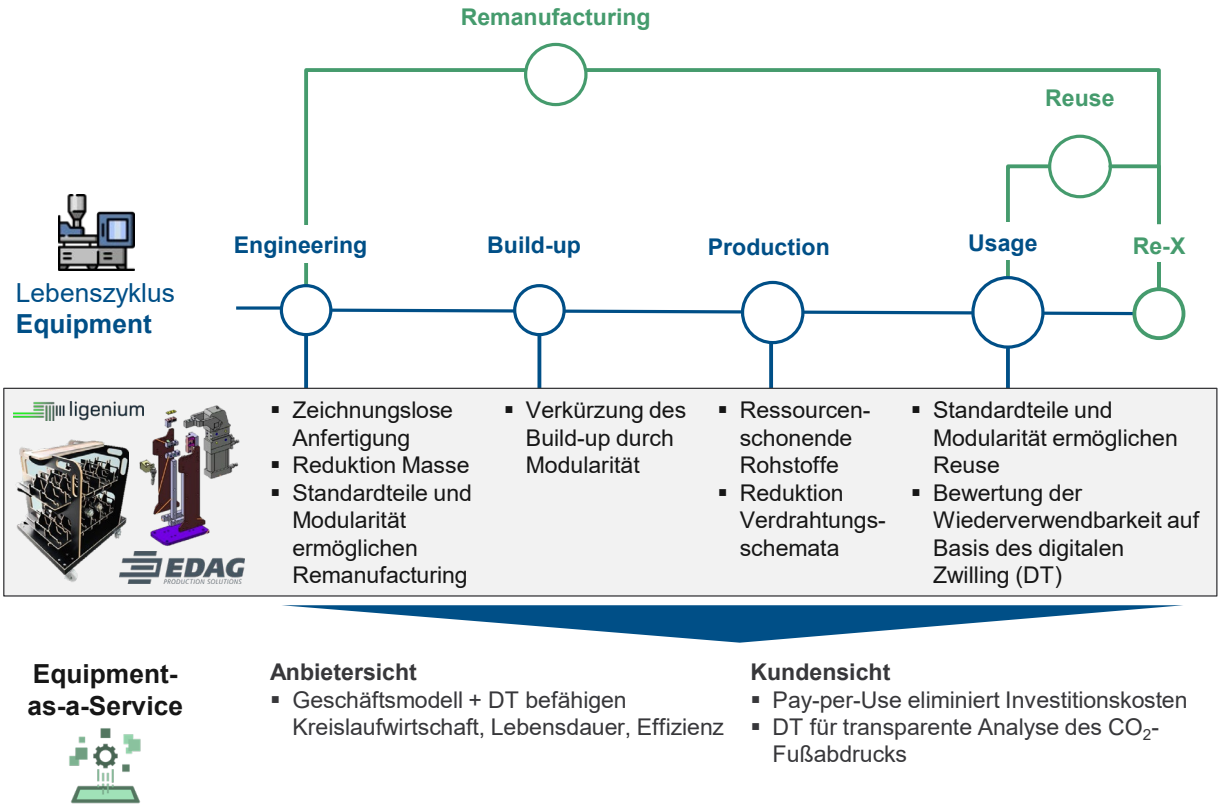


Abbildung 9: Equipment-as-a-Service am Beispiel von ligenium und EDAG PS

5.3 Echtzeit-Virtualisierung einer NC-Steuerung

Im Projekt ViRTNC (Echtzeit-Virtualisierung einer NC-Steuerung zur dynamischen Bereitstellung von Hardwareressourcen für rechenintensive Regelungsalgorithmen) soll systematisch untersucht werden, wie die Virtualisierung von NC-Steuerungen für Werkzeugmaschinen gelingen kann (siehe Abbildung 10). Dazu wird zuerst eine Analyse der Echtzeit-Anforderungen von NC-Steuerungen vorgenommen, danach wird eine Virtualisierungsumgebung konzeptioniert und eingerichtet bevor die virtualisierte Lageregelung eines einzelnen Antriebes implementiert wird. Auf Basis dessen können anschließend Kompensationsmechanismen in der Lageregelung erforscht werden, die eine robuste Regelung trotz Störungen durch auftretende Latenz und Jitter möglich machen. Zusätzlich erfolgt die Erarbeitung von Konzepten zur Orchestrierung und informationstechnischen Absicherung der virtualisierten Steuerungen mithilfe der Teilnehmer des Projektausschusses. Projektbegleitend findet der Aufbau eines Demonstrators in Form einer beispielhaften Werkzeugmaschine statt, anhand dessen die finale Evaluation und Validierung der entwickelten Konzepte erfolgt.

Die Realisierung einer echtzeitfähigen Steuerung und Regelung stellt bei der Virtualisierung und Konsolidierung industrieller Steuerungen eine nicht zu unterschätzende Herausforderung dar. Generell verursacht der sogenannte Hypervisor, der die abstrahierende Softwarekomponente zwischen der Serverhardware und den Betriebssystemen der Steuerungen bildet, eine zusätzliche Latenz, die bei konventionellen PC-basierten Steuerungen nicht auftritt. Um diesem Problem zu begegnen, wird im Projekt ViRTNC ein

hinsichtlich der Echtzeitfähigkeit optimierter und entsprechend konfigurierter Hypervisor eingesetzt mit dem bereits jetzt Scheduling-Latenzen in virtualisierten Steuerungen von wenigen Mikrosekunden garantiert werden können. Darüber hinaus ist jedoch auch die Kommunikation mit Feldgeräten in Echtzeit notwendig, damit das angestrebte Gesamtsystem funktionieren kann. Analog zur Verwendung von kommerzieller Hardware aus dem IT-Bereich auf Seiten des Servers soll soweit möglich auch hinsichtlich der Netzwerkkomponenten auf Commodity-Hardware gesetzt werden. Daher wird evaluiert, inwiefern Priorisierungsmechanismen und Standard-Ethernet eine ausreichend latenzarme Kommunikation zwischen Edge-Server mit virtualisierten Steuerungen und Feldgeräten ermöglichen können. Neben der Realisierung des physischen Netzwerks auf Basis von Commodity-Switches werden außerdem unterschiedliche Konzepte analysiert, um das virtualisierte Netzwerk innerhalb des Edge-Servers in Software oder Hardware zu realisieren. Zur realitätsnahen Evaluierung der Echtzeitfähigkeit des Gesamtsystems erfolgen Messungen der Antwortzeit an digitalen Ein- und Ausgangsklemmen. Im Projekt bisher entstandene Konzepte und Implementierungen sind so weit, dass eine Antwortzeit im Bereich einer Millisekunde erreicht wird. Im weiteren Verlauf des Projekts wird eine NC-Steuerung virtualisiert und mithilfe dieser eine reale Maschine gesteuert.

Erweiterung durch Pay-per-Function

Eine Erweiterung dieses Ansatzes durch zuschaltbare Funktionen bietet dem Kunden eine erhöhte Flexibilität und die Nutzung von aktuellen Lösungen wie zum Beispiel im Bereich der künstlichen Intelligenz. Dies könnte durch ein Modell des Pay-per-Function realisiert werden, welches auf Basis der virtualisierten Hardware möglich ist.

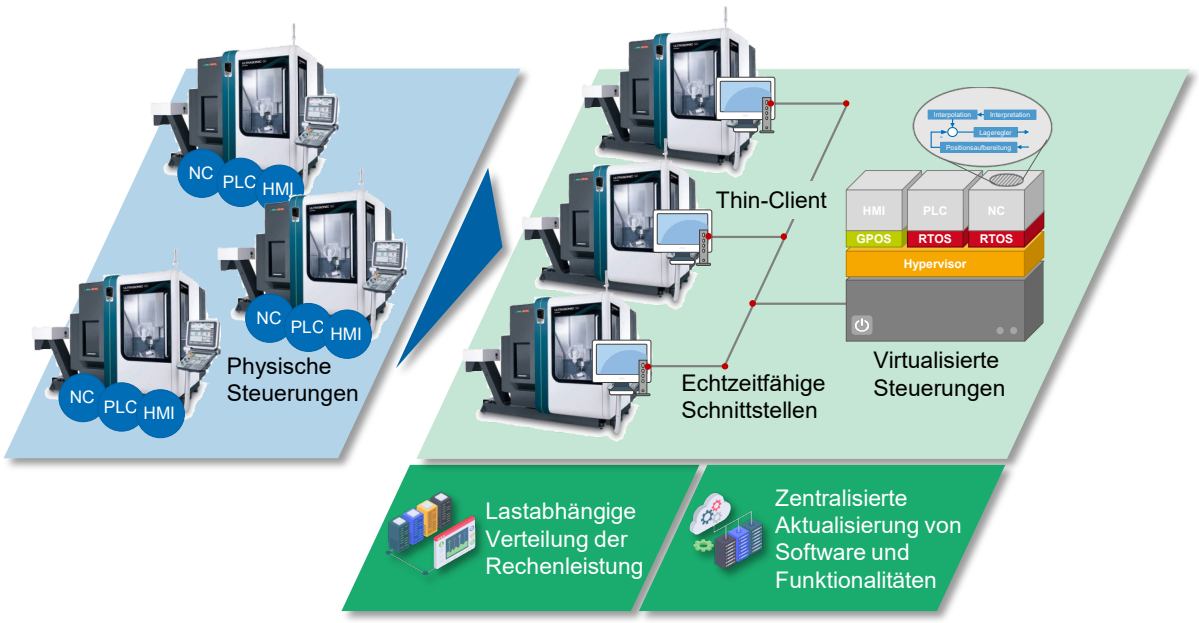


Abbildung 10: Potenziale durch Echtzeitfähige Steuerungsvirtualisierung

5.4 Anwendung von Industrial Metaverse

In Kooperation mit der Boston Consulting Group (BCG), Amazon Web Services (AWS) und Nvidia wurden in der Abteilung Automatisierung und Steuerungstechnik des WZL bereits erste Erfahrungen in der Nutzung des Industrial Metaverse zur Adressierung produktionstechnischer Fragestellungen gesammelt. Dabei wurde folgender Usecase be-

trachtet: Bei der Fertigung von Fahrzeugen wird das Cockpit in der Regel als zusammenhängende Baugruppe in der Karosserie montiert. Die Oberflächen des Cockpits (z. B. der Lederüberzug des Armaturenbretts) dürfen keine Kratzer oder sonstige Beschädigungen aufweisen. Zur Detektion möglicher optischer Defekte werden Computer Vision Systeme eingesetzt, die auf Machine Learning Methoden basieren. Zum Training dieser Methoden werden große, gelabelte Datensätze benötigt, welche sich in dem beschriebenen Szenario erzeugen lassen, indem zahlreiche Bilder von intakten und defekten Cockpitoberflächen erstellt werden. In der Praxis bedeutet dies, dass bei der Inbetriebnahme einer neuen Produktionslinie bzw. der Einführung einer neuen Cockpitoptik noch keine ausreichende Datenbasis vorhanden ist, um Fehlstellen verlässlich zu identifizieren. Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben, bietet das Industrial Metaverse Möglichkeiten zur Lösung dieses Problems: Durch die Erstellung eines fotorealistischen 3D-Modells der Produktionsumgebung und des Cockpits lassen sich die benötigen Bilder zum Training des Computer Vision Systems synthetisch erzeugen. Zur Realisierung des 3D-Modells wurde in diesem Projekt die von Nvidia entwickelte Plattform Omniverse genutzt. Die dabei aufgebaute Systemarchitektur ist in Abbildung 11 dargestellt. Durch die Nutzung des einheitlichen Dateiformates Universal Scene Description (USD) ermöglicht Omniverse eine bidirektionale, herstellerunabhängige Zusammenarbeit verschiedener für die Gestaltung des 3D-Modells notwendiger Programme. So können die aktuellen Zustände des Engineeringprozesses des Cockpits zusammen mit der Simulation der Produktionslinie in einer Fabrikumgebung visualisiert werden. Änderungen in der Gestaltung des Cockpits oder in den Abläufen der Produktionslinie lassen sich in Echtzeit in der kombinierten Szene erkennen. Das so aufgebaute 3D-Modell kann nun für die Erstellung der notwendigen Bilddateien genutzt werden. Modernste Ray-Tracing Technologien unterstützen diesen Prozess durch eine realistische Darstellung von Licht und Reflexionen an Oberflächen. Dabei bietet Nvidia im Rahmen seiner Omniverse Plattform bereits Programmierwerkzeuge an, um den Prozess der synthetischen Generierung von Daten zu beschleunigen und teilweise zu automatisieren.

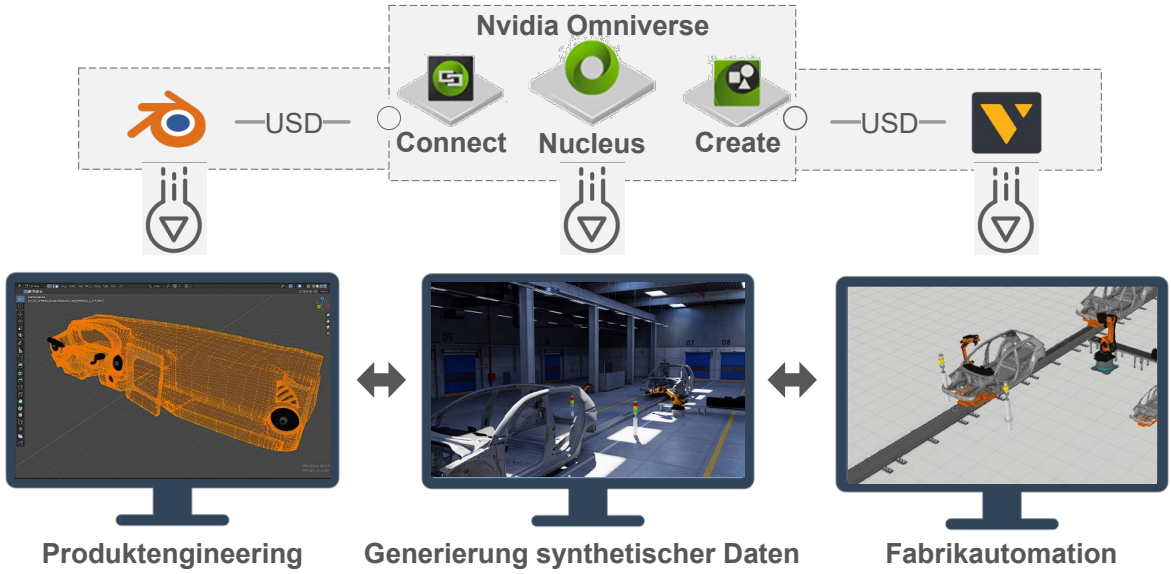


Abbildung 11: Systemarchitektur zur Implementierung des Industrial Metaverse

Dieses Beispiel zeigt, wie das Industrial Metaverse zur Optimierung von Produktionslinien und damit auch zur Steigerung der Nachhaltigkeit beitragen kann. Zusätzlich findet sich auch hier das Potenzial zur Nutzung des as-a-Service Gedanken: Die Bereitstellung von

Plattformen zur Implementierung des Industrial Metaverse sowie die vollständig externe Erstellung der synthetischen Daten lassen sich als mögliches Geschäftsmodell ableiten. Unternehmen, die keine eigenen Mitarbeitenden mit Kenntnis der notwendigen Programme besitzen, können sich die benötige Expertise bzw. die daraus resultierenden Ergebnisse bedarfsgerecht und flexibel einkaufen.

5.5 Hybride Intelligenz in der Montage von Elektromotoren

Die industrielle Montage weist im Falle hoher Prozesskomplexität und bei geringem oder noch unklarem Stückzahlpotenzial in der Regel einen geringen Automatisierungsgrad auf. Im Rahmen des BMBF geförderten Forschungsprojekts GeMeKI (Generalisierung Menschzentrierter KI-Applikationen für die Produktionsoptimierung) wird eine KI-Applikation in der manuellen Kleinserienmontage von Elektromotoren der Fa. Miele betrachtet, bei der die Lagerstellen der Rotoren in das Statorgehäuse händisch verklebt werden. Hierbei handelt es sich um einen qualitätskritischen Prozess, bei dem die automatisch applizierte Kleberaupe nach der Dosierung einer Sichtprüfung durch das Fachpersonal unterzogen wird. Diese Prüfung ist notwendig, da die Qualität der Kleberaupe und des Fügeprozesses abhängig von zahlreichen Einflussgrößen wie den Umgebungsparametern (u.a. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung), Zeiteinflüssen (u.a. Verschleiß, Fließzeit, Lagerdauer) sowie Maschinenparametern an der Dosier- und Einpressstation variiert.

Um die Werkenden bei diesem multifaktoriellen Prozess zu unterstützen und den Schulungsprozess unqualifizierter Mitarbeitenden zu beschleunigen, wird ein System mit hybrider Intelligenz, wie in Abbildung 12 dargestellt, aufgebaut. Dazu werden relevante Parameter sensorisch erfasst und mit Kameradaten der Kleberaupe werkstückspezifisch abgelegt. Um geeignete Daten zum Anlernen einer verlässlichen Assistenz-KI zu erzeugen, labeln die Werkenden alle im Normalbetrieb erfassten Datensätze durch eine i.O./n.i.O-Aussage nach der Sichtprüfung der Kleberaupe. Im Falle einer n.i.O.-Kleberaupe wird zusätzlich eine Fehlerkategorie sowie die Maßnahme zur Behebung des Fehlers angegeben und abgespeichert. Auf Basis dieser Daten entsteht ein durch das Fachpersonal angelerntes, KI-basiertes Assistenzsystem, welches den Mitarbeitenden prozessparallel prognostizierte Qualitätsaussagen zur erfassten Kleberaupe, eine Klassifizierung bei n.i.O. Prognosen sowie Empfehlungen für Verbesserungsmaßnahmen über eine dedizierte Benutzerschnittstelle an die Hand gibt. Durch die kontinuierliche Interaktion mit dem Intelligenzsystem wird die KI über die initiale Trainingsphase hinaus optimiert, sodass eine kontinuierlich wachsende Reduktion von Ausschuss und eine Verbesserung der Produktqualität erreicht werden können. Dies reduziert die Ressourcenverschwendung und verlängert die Produktlebensdauer.

Wesentlicher Projektschwerpunkt ist neben der menschzentrierten Entwicklung, Implementierung und Einführung aller KI-Komponenten und Interaktionsschnittstellen die möglichst hohe Übertragbarkeit aller entwickelten Lösungsbausteine, gleich ob Hardware oder Software. Dies soll die wirtschaftliche Wiederverwendung in anderen Montagelinien, an anderen Standorten und für weitere Produkte ermöglichen. Von den Projektpartnern entsprechend modular entwickelte Lösungsbausteine sollen sich leicht für vielfältige Einsatzzwecke anpassen lassen und zur projektnachgelagerten Verwertung in digitalen Verbundprodukten mehrerer Partner kombinierbar sein.

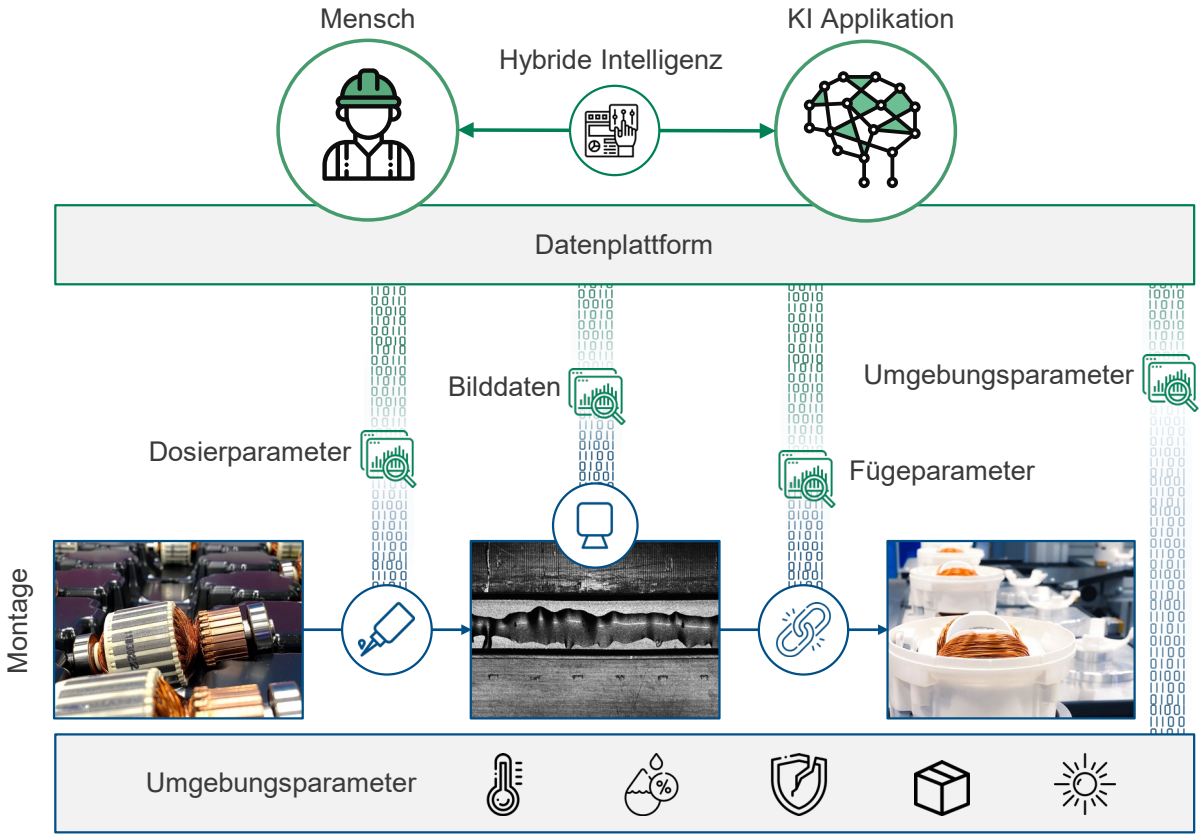


Abbildung 12: Hybride Intelligenz in der Elektromotorenmontage der Fa. Miele

Digitale Verbundprodukte mit as-a-Service Komponenten

Digitale Verbundprodukte setzen sich aus mehreren Modulen unterschiedlicher Art, Größe und Aufgabe zusammen, die von verschiedenen, jeweils auf einen Teilbereich spezialisierten Partnern beigesteuert werden. In der Regel gibt es ein Hardwaresystem, bspw. eine Maschine oder Anlage, sowie ein oder mehrere Software-Module (Microservices), die das Funktionsspektrum der Hardware digital erweitern. Im Falle des KI-basierten Montage-Assistenzsystems ist das Hardwaresystem eine mit Kameratechnik ausgestattete Automationszelle des Automationsspezialisten Xenon, die durch eine vom industriellen KI-Zulieferer aiXbrain entwickelte Qualitätsprognose-KI ergänzt wird.

Für eine gemeinsame Verwertung über den Projektrahmen hinaus braucht es ein gemeinsames Geschäftsmodell, das allen Partnern einen wirtschaftlichen Anreiz bietet und zeitgleich deren Hoheit über die jeweils beigesteuerten Komponenten sichert. Das Einbringen von modularen Komponenten in einem kommerziellen und technischen as-a-Service Modell ist ideal geeignet für diesen Fall, insbesondere für diejenigen Partner, die digitale Module zur Funktionserweiterung beisteuern. Konsequenterweise bietet ein KI-Zulieferer wie aiXbrain seine Produkte daher auch als Software-as-a-Service an, und zwar mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Subskriptions + Pay-per-X Modell. Das as-a-Service Modell wird somit zum Klebstoff für neuartige digitale Verbundprodukte, mit denen sich die großen Herausforderungen rund um die nachhaltige Produktion anders und voraussichtlich auch besser lösen lassen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag werden Ansätze zur Implementierung einer Kreislaufwirtschaft, zur Verlängerung der Lebensdauer und zur Steigerung der Effizienz mit Hinblick auf eine nachhaltige Produktion vorgestellt. Dabei werden digitale Technologien wie digitale Zwillinge, Virtualisierung, Metaverse und künstliche Intelligenz als Enabler identifiziert, um die Potenziale zu heben. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen stellt die Anwendung dieser Technologien jedoch noch eine große Herausforderung dar. Der teils hohe Investitionsbedarf und das häufige Fehlen der notwendigen Expertise hemmen die Unternehmen bei der Umsetzung. Gleichzeitig bedingen die teils schwankende Kundennachfrage sowie instabile Lieferketten und damit einhergehende Produktionsausfälle eine gewisse Flexibilität und Agilität.

Sustainable Production-as-a-Service bietet die digitalen Lösungen “as-a-Service" an, um Kunden ein breites Angebot an digitalen Technologien, physischen Assets und zugehörigen Services zur Verfügung zu stellen und eine optimale Lösung zu finden. Durch die Rückführung des Produkts nach dem Lebens- bzw. Nutzungszyklus kann der Anbieter das Produkt oder einzelne Komponenten im Sinne der Kreislaufwirtschaft aufbereiten und dem nächsten Nutzungszyklus zuführen. Alternative Vertriebssysteme wie das Machine Sharing ermöglichen zudem eine höhere Auslastung der Produkte oder Produktionssysteme. Während der Kunde durch aaS-basierte Lösungen in die Lage versetzt wird, kurzfristige Unterbrechungen des Geschäftsbetriebs zu überbrücken, eröffnen sich für den Anbieter Möglichkeiten zur Erschließung neuer Kundengruppen.

Das Konzept der Sustainable Production-as-a-Service wurde anhand von zwei Beispielen vorgestellt, welche die Produkte Ladungsträger bzw. Spannsysteme als as-a-Service-Modell anbieten. Zusätzlich wird anhand von drei Projekten aus der Forschung des WZL dargestellt, wie die genannten digitalen Technologien in Kombination mit dem as-a-Service-Modell Nachhaltigkeitspotenziale in der Produktion heben können.

Ansätze für die Zukunft

Die vorgestellten Lösungsansätze bedingen eine ganzheitliche Datenerfassung über den vollständigen Lebenszyklus eines Produktes hinweg, um Potenziale hinsichtlich der Kreislaufwirtschaft zu bergen. Dies setzt eine ununterbrochene Datenerfassung entlang der Wertschöpfungskette voraus und vor allem eine Vernetzung zwischen den Unternehmen aber auch die Kooperation der Benutzer. Gerade Wettbewerbsgedanken zwischen Unternehmen und Sicherheitsbedenken von Nutzern stehen dieser benötigten Vernetzung und Transparenz gegenüber. Ersteres erfordert die Entwicklung eines Sustainability Mindsets der Unternehmen und die Erkenntnis, dass eine Öffnung auch dem eigenen Geschäft dienen kann. Die Bereitschaft zur Annahme von Innovation und Veränderung sind Voraussetzungen für eine nachhaltige Produktion.

7 Literatur

[1] UNRIC - Regionales Informationszentrum der Vereinten Nationen. „Ziele für nachhaltige Entwicklung." unric.org. https://unric.org/de/17ziele/ (Zugriff am: 26. Jan. 2023).

[2] A. Bonfanti, G. Mion, F. Brunetti und A. Vargas‐Sánchez, „The contribution of manufacturing companies to the achievement of sustainable development goals: An empirical analysis of the operationalization of sustainable business models," *Business Strategy and the Environment*, 2022, Early View, doi: 10.1002/bse.3260.

[3] A. Kampker, P. Burggräf, T. Welter, S. Kamp und J. Thul, „Factory Carbon Footprint Design," *Advanced Materials Research,* Jg. 907, S. 455-462, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.907.455.

[4] D. Schiermeier *et al.* „Green Skills: In jedem und jeder von uns steckt ein Green Collar." plattform-i40.de. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/AG5_Impuls-GreenSkills.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (Zugriff am: 18. Jan. 2023).

[5] Umweltbundesamt. „Der Europäische Emissionshandel." umweltbundesamt.de. https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels (Zugriff am: 18. Jan. 2023).

[6] I. V. Muralikrishna und V. Manickam, „Life Cycle Assessment," in *Environmental Management: Science and Engineering for Industry*, Amsterdam: Elsevier, 2017, S. 57–75.

[7] The Climate Choice. „Product-Carbon-Footprint: 3 Normen, 3 Anwendungsbereiche." theclimatechoice.com. https://theclimatechoice.com/de/product-carbon-footprint-3-normen-3-anwendungsbereiche/ (Zugriff am: 20. Feb. 2023).

[8] *DIN EN ISO 14067:2019-02, Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten: Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung*, 14067:2019-02, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2019.

[9] J. Ranganathan *et al*. „The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard: Revised Edition." ghgprotocol.org. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf (Zugriff am: 11. Apr. 2023).

[10] L. Klaaßen und C. Stoll, „Harmonizing Corporate Carbon Footprints," *Nature Communications,* Jg. 12, Art.-Nr. 6149, 2020, doi: 10.1038/s41467-021-26349-x.

[11] M. Fraser *et al*. „The Circularity Gap Report 2023." circularity-gap.world. https://www.circularity-gap.world/2023#download (Zugriff am: 11. Apr. 2023).

[12] J. Kirchherr, D. Reike und M. Hekkert, „Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions," *SSRN*, 2017, doi: 10.2139/ssrn.3037579.

[13] J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell und A. Hanemaaijer. „Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain: Policy Report." pbl.nl. https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf (Zugriff am: 11. Apr. 2023).

[14] M. Riesner, C. Dölle, C. Mattern und J. Kreß, „Circular Economy: Challenges and Potentials for the Manufacturing Industry by Digital Transformation," in *2019 IEEE*

International Symposium on Innovation and Entrepreneurship (TEMS-ISIE), Piscataway: IEEE, 2019, doi: 10.1109/TEMS-ISIE46312.2019.9074421.

[15] H. Wilts und H. Berg. „Digitale Kreislaufwirtschaft: Die Digitale Transformation als Wegbereiter ressourcenschonender Stoffkreisläufe.“ epub.wupperinst.org. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6977/file/6977_Wilts.pdf (Zugriff am: 11. Apr. 2023).

[16] V. Schulze *et al.* „Update-Factory für ein industrielles Produkt-Update: Ein Beitrag zur Kreislaufwirtschaft.” wgp.de. https://wgp.de/wp-content/uploads/03_Impulspaper_WBK_2021-09_ES_WEB.pdf (Zugriff am: 11. Apr. 2023)

[17] A. C. H. Skelton und J. M. Allwood, „Product life trade-offs: what if products fail early?,” *Environmental Science & Technology*, Jg. 47, Nr. 3, S. 1719–1728, doi: 10.1021/es3034022.

[18] A. Chen und J. Blue, „Recipe-Independent Indicator for Tool Health Diagnosis and Predictive Maintenance,“ *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Jg. 22, Nr. 4, S. 522–535, 2009, doi: 10.1109/TSM.2009.2028215.

[19] M. Roesch, J. Köberlein, M. Goldmanns und A. Hohmann, „Green-Lean-Digital als Leitbild für die nachhaltige Fabrik der Zukunft,“ *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 116, 1-2, S. 29–33, 2021, doi: 10.1515/zwf-2021-0006.

[20] C. G. Machado, M. P. Winroth und E. H. D. Ribeiro da Silva, „Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda,“ *International Journal of Production Research*, Jg. 58, Nr. 5, S. 1462–1484, 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1652777.

[21] R. Baierl und M. Stiebitz*,* „Potenziale des Digitalen Zwillings im Produktlebenszyklus,“ in *Smart Services: Band 1: Konzepte – Methoden – Prozesse* (Forum Dienstleistungsmanagement), M. Bruhn und K. Hadwich, Hg., Wiesbaden: Springer Gabler, 2022, S. 291-307.

[22] M. W. Waibel, L. P. Steenkamp, N. Moloko und G. A. Oosthuizen, „Investigating the Effects of Smart Production Systems on Sustainability Elements,“ *Procedia Manufacturing*, Jg. 8, S. 731–737, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.02.094.

[23] C. Brecher *et al.,* „Data Science in Production,“ in *Internet of Production - Turning Data into Sustainability: AWK’21,* T. Bergs, C. Brecher, R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2021, S. 202-230.

[24] C. Brecher *et al.*, „Virtualisierung und Vernetzung in Produktionssystemen,“ in *Integrative Produktion: Industrie 4.0: Aachener Perspektiven,* C. Brecher, F. Klocke, R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2014, S. 35-63.

[25] T. Heinrich. „Green IT – Server- und Desktopvirtualisierung betrachtet unter dem Green IT – Server- und Desktopvirtualisierung betrachtet unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit.“ mediamundo.biz. https://www.mediamundo.biz/res/downloads/Whitepaper+Green+IT.pdf (Zugriff am: 11. Apr. 2023).

[26] T. Kampa, C. K. Muller und D. Großmann, „IP-based Architecture for an Edge Cloud enabled Factory: Concept and Requirements,” in *18th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems 2022*: *WFCS 2022 Communication in Automation: 27 – 29 April 2022, Pavia, Italy*, Piscataway: IEEE, 2022, doi: 10.1109/WFCS53837.2022.9779162.

[27] L.-H. Lee *et al.,* „All One Needs to Know about Metaverse: A Complete Survey on Technological Singularity, Virtual Ecosystem, and Research Agenda,“ 2021, doi: 10.48550/arXiv.2110.05352.

[28] S. Mystakidis, „Metaverse," *Encyclopedia*, Jg. 2, Nr. 1, S. 486–497, 2022, doi: 10.3390/encyclopedia2010031.

[29] A. Grasso. „Industrial Metaverse: the autonomous business ecosystem paving the way toward Industry 5.0." antgrasso.medium.com. https://antgrasso.medium.com/industrial-metaverse-the-autonomous-business-ecosystem-paving-the-way-toward-industry-5-0-618033fabfc7 (Zugriff am: 1. Mär. 2023).

[30] G.-J. Hwang und S.-Y. Chien, „Definition, roles, and potential research issues of the metaverse in education: An artificial intelligence perspective," *Computers and Education: Artificial Intelligence*, Jg. 3, Art.-Nr. 100082, 2022, doi: 10.1016/j.caeai.2022.100082.

[31] BMW Group. „BMW Group und NVIDIA heben virtuelle Fabrikplanung auf die nächste Ebene." press.bmwgroup.com. https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0329569DE/bmw-group-und-nvidia-heben-virtuelle-fabrikplanung-auf-die-naechste-ebene?language=de (Zugriff am: 1. Mär. 2023).

[32] D. Shapiro. „Manufactured in the Metaverse: Mercedes-Benz Assembles Next-Gen Factories With NVIDIA Omniverse: Premium automaker implements digital-first approach to production." blogs.nvidia.com. https://blogs.nvidia.com/blog/2023/01/03/mercedes-benz-next-gen-factories-omniverse/ (Zugriff am: 1. Mär. 2023).

[33] Nvidia. „Verbinden Sie 3D-Welten mit Workflows: Erstellen Sie individuelle 3D-Workflows und verbinden Sie vorhandene Workflows mit Universal Scene Description und NVIDIA Omniverse™." nvidia.com. https://www.nvidia.com/de-de/omniverse/solutions/3d-design-collaboration/ (Zugriff am: 1. Mär. 2023).

[34] S. Moonen, B. Vanherle, J. de Hoog, T. Bourgana, A. Bey-Temsamani und N. Michiels, „CAD2Render: A Modular Toolkit for GPU-accelerated Photorealistic Synthetic Data Generation for the Manufacturing Industry," in *WACVW 2023: 2023 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision Workshops*: *Proceedings*, Piscataway: IEEE, 2023, S. 583–592, doi: 10.1109/WACVW58289.2023.00065.

[35] M. Belke, P. Blanke, S. Storms und W. Herfs, „Object pose estimation in industrial environments using a synthetic data generation pipeline," in *2022 Sixth IEEE International Conference on Robotic Computing: IRC 2022: Proceedings*, Piscataway: IEEE, 2022, S. 435–438, doi: 10.1109/IRC55401.2022.00084.

[36] I. Seifert *et al.* "Potenziale der künstlichen Intelligenz im produzierenden Gewerbe in Deutschland: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm PAiCE – Platforms | Additive Manufacturing | Imaging | Communication | Engineering." bmwk.de. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/potenziale-kuenstlichen-intelligenz-im-produzierenden-gewerbe-in-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Zugriff am: 1. Mär. 2023).

[37] A. Kharatyan *et al.,* „Künstliche Intelligenz im Engineering: Menschorientiere Analyse von Potenzialen am Beispiel vom Sondermaschinenbau," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 117, Nr. 6, S. 427–431, 2022, doi: 10.1515/zwf-2022-1074.

[38] O. Petrovic, L. Schaper, S. Roggendorf, S. Storms und C. Brecher, „Sim2Real Deep Reinforcement Learning of Compliance-based Robotic Assembly Operations," in *MMAR: 26th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics: 22-25 August 2022, Amber Baltic Hotel, Miedzyzdroje, Poland: technical papers*, Piscataway: IEEE, 2022, S. 300–305, doi: 10.1109/MMAR55195.2022.9874304.

[39] L. Eversberg und J. Lambrecht, „Generating Images with Physics-Based Rendering for an Industrial Object Detection Task: Realism versus Domain Randomization," *Sensors*, Jg. 21, Nr. 23, Art.-Nr. 7901, doi: 10.3390/s21237901.

[40] O. Petrovic *et al.,* „Hybride Intelligenz – Mensch und KI im Zusammenspiel: Entwicklung und Einführung von Produktionsprozessen mit KI-Assistenzsystem," *wt werkstattstechnik online*, Jg. 112, Nr. 5, S. 330–335, 2022, doi: 10.37544/1436-4980-2022-05-60.

[41] B. Pokorni, M. Braun und C. Knecht, „Menschzentrierte KI-Anwendungen in der Produktion: Praxiserfahrungen und Leitfaden zu betrieblichen Einführungsstrategien," W. Bauer, O. Riedel, T. Renner und M. Peissner, Hg., 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.24406/publica-fhg-300817.

[42] G. Schuh, L. Wenger, V. Stich, J. Hicking und J. Gailus, „Outcome Economy: Subscription Business Models in Machinery and Plant Engineering," *Procedia CIRP*, Jg. 93, S. 599–604, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.04.146.

[43] M. Braun *et al.* „Everything-as-a-Service: XAAS: How Business can Thrive in the Age of Climate Change and Digitalization." systemiq.earth. https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2021/11/XaaS-MainReport.pdf (Zugriff am: 14. Mär. 2023).

[44] M. Cook, „Understanding the potential opportunities provided by service orientated concepts to improve resource productivity," in *Design and Manufacture for Sustainable Development 2004,* T. Bhamra und B. Hon, Hg., Hoboken: Wiley, 2004, S. 123-134.

[45] T. Shan, P. Hofmann, E. Feig und J. Zhang. From SaaS to XaaS: Evolution and Outlook of Software Cloud [Online]. Verfügbar: https://web.archive.org/web/20110728093045/http://www.thecloudcomputing.org/2009/1/panels.html#Panel2

[46] U. Seebacher, *Assets-as-service: Service statt Produkte - so gelingt der Einstieg in die Service-Economy* (Essentials). Wiesbaden: Springer Gabler, 2021.

[47] S. Bund, L. Franke und J. Krapf. „"As-a-service" business models as a catalyst of the Sustainable Development Goals." sgd-investments.com. https://sdg-investments.com/fileadmin/user_upload/White_Paper_How_the_Sustainable_Goals_are_promoted_through_as-a-service_business_models.pdf (Zugriff am: 14. Mär. 2023).

Die Inhalte für den Vortrag 3.2 erarbeiteten die Autor:innen mit weiteren Expert:innen in dieser Arbeitsgruppe:

Christoph Alt, ligenium, Chemnitz
Philipp Blanke, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen
Dr.-Ing. Frank Breitenbach, EDAG PS, Fulda
Dr.-Ing. Tilman Buchner, BCG, München
Yannick Dassen, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Alexander Engels, aiXbrain, Aachen
Mathias Kaldenhoff, SAP, Walldorf
Oliver Petrovic, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Simon Rekers, DX FACTURE, Aachen
Dr.-Ing. Richard Schares, Makino, Aachen
Simon Storms, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Tilman Taubert, Cisco, Eschborn
Minh Trinh, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Markus Will, Cisco, Eschborn
Steffen Wurm, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

3.3 Quantifizierung der Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit

T. Bergs, P. Niemietz, T. Kaufmann, D. Gelbich, J. Mayer, J. Moon, J. Gerhard, A. Peters, F. Seiferth

Gliederung

1 Einleitung 279

2 Innovationen in der Herstellung von Flachprodukten in der Stahlindustrie 281
2.1 Emissionen in der Stahlproduktion 281
2.2 Nutzung technologischer alternativen zur Verringerung des CO_2-Fußabdrucks bei der Stahlproduktion 281
2.3 Vermehrte Verwendung von Metallschrott 282
2.4 Auswirkungen der Trends auf nachfolgende Prozessschritte 283

3 Defizite bei der Verwendung von Materialdaten in der Blechverarbeitung 283
3.1 Methodisches Defizit 284
3.2 Wissensdefizit 286
3.3 Defizit bei der digitalen Integration 287

4 Vision einer datengetriebenen Parametrisierung von Prozessen basierend auf Materialdaten 288
4.1 Vision einer datengetriebene Parametrisierung von Prozessen auf Basis von Werkstoffdaten 289
4.2 Direkte datenbasierte Kollaboration 291
4.3 Digitale Integration von Lieferketten 292

5 Quantifizierung der Auswirkungen? 293

6 Literatur 296

doi: 10.24406/publica-966

Kurzfassung

Quantifizierung der Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit

Die Nachhaltigkeit der globalen Wirtschaft ist zu einem kritischen Aspekt für Politik und Wirtschaftsinvestitionen geworden, wobei die UN-Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung spezifische Ziele und Indikatoren für nachhaltige Entwicklung festlegt. Während die CO_2-Reduktion aktuell ein primärer Fokus ist, müssen auch andere Ziele wie Wassermanagement oder soziale Ziele berücksichtigt werden. Die Wechselwirkung zwischen Nachhaltigkeitszielen und Indikatoren zu verstehen, ist jedoch komplex. Die Komplexität der Auswirkungen von Technologien auf die Nachhaltigkeitsziele kann anhand eines aktuellen Beispiels in der Automobil-Stahl-Lieferkette veranschaulicht werden. In dieser Branche sind der Energieverbrauch und die Kohlenstoffemissionen hoch, und daher sind innovative Technologien erforderlich, um den Übergang zu einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Lieferkette zu unterstützen. Gleichzeitig durchläuft die Branche enorme Veränderungen, die traditionelle Geschäftsmodelle aufgrund des Übergangs zur Produktion nachhaltiger Produkte oder der Umsetzung nachhaltiger Betriebsabläufe beeinflussen. Die Betrachtung eines Beispiels für die Erfassung, Nutzung und gemeinsame Nutzung von Materialdaten zur Verbesserung der Zusammenarbeit entlang der Lieferkette und zur Reduzierung von Ausschuss zeigt die derzeitige Komplexität bei der Bewertung der Einführung solcher Ansätze im größeren Maßstab. Aufgrund der Schwierigkeiten, den tatsächlichen Einfluss einer Maßnahme oder Technologie zu quantifizieren, müssen Entscheidungen über den Übergang zu nachhaltigen wirtschaften auf Intuition anstatt auf konkret quantifizierte Auswirkungen basieren. Innovationsentscheidungen müssen die persönliche Verantwortung für die Nachhaltigkeit von der Produktionsunternehmen berücksichtigen.

Abstract

Quantification of Sustainability Impact

The global economy's sustainability has become a critical aspect for politics and economic investments, with the UN 2030 Agenda for Sustainable Development outlining specific targets and indicators for sustainable development. While CO_2 reduction is a primary focus, other goals such as water management or social goals must be considered. However, understanding the interaction between sustainability targets and indicators is complex. The complexity of sustainability impact of technology or measure can be illustrated by recent example in the automotive steel supply chain. Here, the current impact on energy consumption and carbon emissions are high, and therefore, innovative technologies are needed to support the transition into a sustainability focused supply chain. Simultaneously, the industry is undergoing tremendous changes that impact traditional business models due to the shift to either production of sustainable products, or implementation of sustainable operations. The consideration of an example in material data acquisition, utilization and sharing to enhance collaboration throughout supply chain and reduce waste shows the current of complexity of assessing the introduction of such approaches on a broader scale. Yet, due to the difficulties to quantify the actual impact of a measure or technology, decisions on transitioning to sustainable operations must be based on intuition rather than a concretely quantified sustainability impact, as assessing these impacts is currently beyond available capacity. Innovation decisions must consider personal responsibility for the sustainability of production and the economy.

1 Einleitung

In den letzten Jahren ist die Nachhaltigkeit der globalen Wirtschaft zu einem kritischen Aspekt für zukünftige Entscheidungen in der Politik und zunehmend für Wirtschaftsinvestitionen geworden. Die Ziele für eine nachhaltige Entwicklung wurden in der UN-Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung definiert, welche auf 169 individuellen Nachhaltigkeitszielen und 231 Indikatoren zur Messung basiert [1]. Wenn Wirtschaftsblöcke in großem Maßstab und Unternehmen in kleinerem Maßstab zu diesen Zielen beitragen möchten, ist es essenziel zu wissen, welche Maßnahmen zur Stärkung zukünftiger Nachhaltigkeit jetzt ergriffen werden können. Dies ist nicht nur in Bezug auf CO_2 Emissionen wichtig, sondern sollte auch weitere Ziele mit einbeziehen wie zum Beispiel nachhaltiges Wassermanagement oder soziale Aspekte. Das Verständnis der Wechselwirkung zwischen allen Nachhaltigkeitszielen und Indikatoren an sich jedoch ein komplexes und fortlaufendes Forschungsfeld mit offenen Fragen [2], was den Bezug auf konkrete Maßnahmen noch schwieriger gestaltet.

Für Unternehmen weltweit treibt der Nachhaltigkeitsgedanke einen Wandel hin zu nachhaltigeren Technologien voran, was die Frage aufwirft, wie der Beitrag einer konkreten Technologie zu den Nachhaltigkeitszielen langfristig bewertet werden kann. Dies gilt insbesondere für Technologien, die potenziell nicht nur die lokalen Betriebsabläufe eines Unternehmens beeinflussen, sondern ganze Wertschöpfungsströme transformieren können. Ziel dieses Artikels ist es, das Bewusstsein für die Komplexität der Quantifizierung der Nachhaltigkeitsauswirkungen und die Auswirkungen für Unternehmen anhand eines konkreten Beispiels in der Automobilblechverarbeitungsindustrie zu schärfen, das im Folgenden vorgestellt wird.

Die Automobil-Stahlindustrie ist eine der größten metallverarbeitenden Industrien mit starkem Fokus auf Qualität und Zuverlässigkeit bei gleichzeitiger Kostensensitivität [3]. Der Übergang zu einer grünen Wirtschaft führt hier zum Fokus auf die Produktion nachhaltiger Produkte, z.B. Antriebssträngen auf Basis von Brennstoffzellen oder rein elektrischen Antrieben, sowie auf die Implementierung nachhaltiger Produktions- und Betriebsabläufe. Dieser Wandel zusammen mit zusätzlichen disruptiven Entwicklungen befeuert eine aktuelle Drucksituation, welche die Lieferkette in der Automobilindustrie besonders betrifft (siehe Abbildung 1):

1. **Der Übergang zu einer grünen Wirtschaft.** Da die Stahlproduktion einer der größten emissionsverursachenden Industriezweige in Deutschland ist, wurde der Übergang zu einem umweltfreundlichen Stahlproduktionsverfahren politisch sowie die verstärkte Verwendung von Metallschrott zur Senkung des Kohlenstoff-Fußabdrucks von Branchenverbänden forciert. Beide Maßnahmen wirken sich zwar positiv auf die Emissionen aus, haben aber das Potenzial die nachgelagerte Stahlverarbeitung durch beeinträchtigte Qualitätsmerkmale zu beeinflussen.
2. **Demografischer Wandel.** Der demografische Wandel, der sich aus dem Ausscheiden der Babyboomer-Generation ergibt, stellt eine große Herausforderung für die verarbeitende Industrie dar. Der Verlust von Arbeitskräften sowie ihres wichtigen erfahrungsbasierten Wissens und die Veränderung in den Anforderungen an Mitarbeitende durch Einführung digitaler Technologien führen zu einem Fachkräftemangel und beeinträchtigt die Flexibilität der Unternehmen.

3. **Die Diversifizierung der Antriebsstränge in der Automobilindustrie.** Die Verlagerung der Automobilindustrie hin zur Elektrifizierung und zu alternativen Antriebssystemen führt zu einer Veränderung in den nachgefragten Produktgruppen. Die blechverarbeitenden Unternehmen stehen unter dem Druck, neue Produktgruppen innerhalb der Produktion neuer Antriebsstränge zu erschließen. Hierdurch müssen unter Umständen bestehende Prozesse angepasst und neue Technologien erschlossen werden, um den veränderten Anforderungen gerecht zu werden [4].

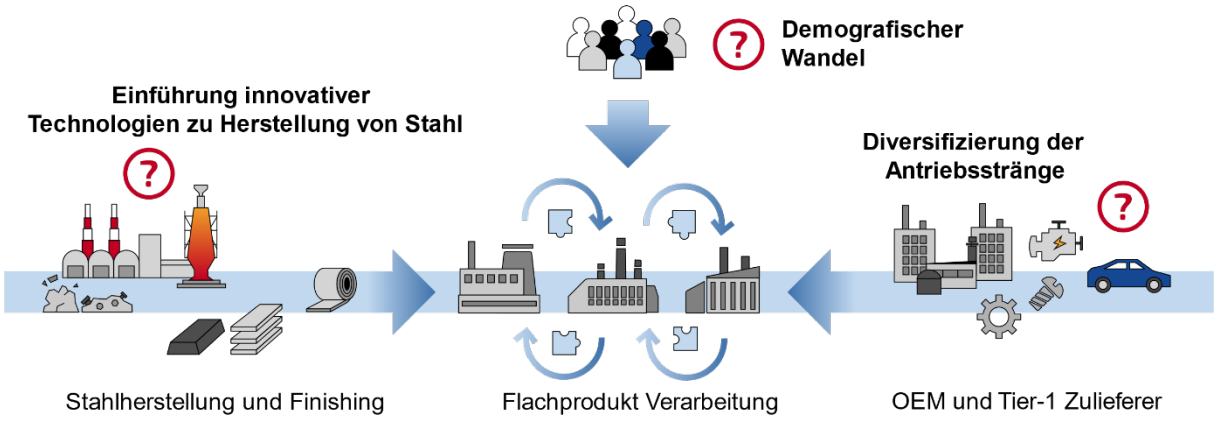


Abbildung 1: Aktuelle Situation in der Lieferkette

Alle drei Herausforderungen erfordern eine erhöhte Belast- und Anpassbarkeit von Unternehmen in der Lieferkette, wenn es um Produkte oder die Verarbeitung von Stahlerzeugnissen geht. Die in diesem Beitrag betrachtete Technologie konzentriert sich auf die Informationslücke bei den verarbeiteten Werkstoffen in der Lieferkette für Bleche. Derzeit sind die Datenspezifikationen für Flacherzeugnisse spärlich, während durch Werkstoffprobleme verursachte Fehler regelmäßig und unerwartet auftreten. Die geringe Informationsgrundlage erschwert jedoch eine vorbeugende Anpassung der Prozessparametrisierung oder die Erkennung von Problemen. Die kontinuierliche Messung mechanischer Eigenschaften von Stahlblechen in der Produktion und der unternehmensübergreifende Austausch dieser Informationen kann eine datenbasierte Alternative zu den derzeitigen erfahrungsbasierten Trial-and-Error-Ansätzen darstellen. Dies ermöglicht schließlich den Übergang von implizitem Wissen aus Erfahrungswerten hin zu explizitem Wissen, welches von den Mitarbeitenden leichter übertragen und weitergegeben werden kann.

Um die Schwierigkeiten zu verstehen, mit denen die Branche derzeit konfrontiert ist, werden in Kapitel 2 wichtige Veränderungen in der Rohstahlproduktion, die sich auf nachgelagerte Prozesse wie der Blechverarbeitung auswirken, sowie deren Einfluss auf die Lieferkette beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 3 drei aktuelle Defizite in der Branche skizziert, gefolgt von der Beschreibung der technischen Lösung, Zwischenergebnissen und einer Vision, wie sie die Branche verändern könnte, in Kapitel 4. Das abschließende Kapitel 5 enthält einen Überblick über die konkreten Hindernisse für die Integration neuer verfügbarer Technologien in Deutschland, insbesondere aus Sicht von KMUs.

2 Innovationen in der Herstellung von Flachprodukten in der Stahlindustrie

In diesem Kapitel werden einige der wichtigsten Veränderungen in der Herstellung von Stahlflachprodukten dargestellt und deren Auswirkungen auf nachfolgende Prozessschritte in der Lieferkette diskutiert.

2.1 Emissionen in der Stahlproduktion

Die Anfänge der deutschen Stahlindustrie geht zurück bis ins 19. Jahrhundert, als das Land zu einem der führenden Stahlproduzenten der Welt aufstieg [5]. Im Jahr 2020 verzeichnete Deutschland mit rund 83.200 Arbeitnehmenden die höchste Zahl an Beschäftigten in der europäischen Stahlindustrie, welche erheblich zum Bruttoinlandsprodukt der Bundesrepublik beigetragen hat [6]. Die Erzeugung von Stahlerzeugnissen ist ein komplexer Prozess und umfasst mehrere Prozessstufen von der Roheisengewinnung über Formgebung und Nachbearbeitung der zur Feinjustierung der mechanischen Eigenschaften des resultierenden Halbzeugs [5]. Die Stahlindustrie insgesamt ist gleichzeitig mit hohen CO_2-Emissionen verbunden, da sie aktuell den Einsatz großer Mengen an fossilen Energieträgern erfordert. Im Jahr 2020 verursachte die deutsche Stahlindustrie nach Angaben des EU-Statistikamtes [7] rund 48 Mt CO_2-Äquivalent und hält mit rund 28 % den größten Anteil an den industriellen Emissionen in Deutschland [8]. Zwar konnten die Emissionen seit 1990 deutlich und um fast 40 % gesenkt werden [9], aber auch die Weiterverarbeitung von Stahl sowie die Herstellung und Montage von Stahlbauteilen, insbesondere in der Automobilindustrie, tragen weiterhin wesentlich zu den CO_2-Emissionen der Branche bei. Zwischen 2017 und 2020 wurden durchschnittlich 40 Mt Stahl produziert, davon 26 % für die Automobilindustrie, 11 % für den Maschinenbau, 9 % für Rohre und 12 % für kleinere Stahlerzeugnisse [10]. Die deutsche Stahlindustrie bewegt sich aktuell zwischen ihrer wirtschaftlichen Relevanz und ihren negativen Umweltauswirkungen und gerät durch den neuen Fokus auf Nachhaltigkeit unter Zugzwang.

2.2 Nutzung technologischer alternativen zur Verringerung des CO_2-Fußabdrucks bei der Stahlproduktion

Die Hochofen-Konverter-Route, auch als integrierte Route bekannt, ist die am weitesten verbreitete Methode der Stahlherstellung weltweit. Es beginnt damit, dass nur die gröberen Stückerze direkt aus den in den Minen abgebauten Erzen (Stückerz, Feinerz) verwendet werden können. Feinerze müssen zunächst zu Pellets oder Sinter agglomeriert werden, bevor sie weiterverarbeitet werden können [11]. Anschließend werden sie zur Hochofenanlage transportiert und dort eingespeist. Im Inneren des Ofens werden sie auf über 1.500 °C erhitzt. Infolge der hohen Temperaturen kommt es zu Reaktionen und es entsteht Roheisen sowie ein Abgas, das Hochofengas. Das im Hochofen erzeugte Roheisen wird dann in einem Konverter zu Rohstahl verarbeitet. Im Konverter wird das Roheisen auf eine Temperatur von mindestens 1.500 °C erhitzt und Sauerstoff durch eine Lanze in das Gefäß geblasen. Die durch den Sauerstoffschmelzprozess erzeugte Schmelze wird einer weiteren sekundärmetallurgischen Behandlung unterzogen, die die Temperatur sowie die Zusammensetzung der Schmelze anpasst, indem Legierungselemente hinzugefügt und Begleitelemente wie Schwefel entfernt werden. Die Schmelze wird dann in einer Stranggussanlage verarbeitet, wo sie in eine Form gegossen und abgekühlt wird, um in ein Halbzeug zu erstarren.

Direktreduktion mit Wasserstoffgas (HDR) hingegen ist eine Stahlherstellungsmethode, bei der Wasserstoffgas anstelle von Kohle zur Reduktion von Eisen verwendet wird, das als direkt reduziertes Eisen (DRI) bekannt ist. Dieser Prozess ist nicht neu, wird aber derzeit nicht umfangreich in der Industrie eingesetzt. Im HDR-Prozess wird Eisenerz in einen Reaktor eingebracht, in dem es erhitzt und Wasserstoffgas ausgesetzt wird. Wasserstoff reagiert mit dem Eisenerz und reduziert es zu hochreinem Eisen. Das direkt reduzierte Eisen wird dann weiterverarbeitet, um Roheisen herzustellen. Die Stahlherstellung über den HDR-Prozess gilt als nachhaltigere und umweltfreundlichere Alternative zum traditionellen Hochofenverfahren (siehe Abbildung 2). Dieser Prozess wird bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunkts von Eisen (< 1000 °C) durchgeführt, wodurch auch erhebliche Energiekosten eingespart werden [12]. Außerdem werden während des Prozesses deutlich geringere Emissionen von CO_2 und anderen Schadstoffen ausgestoßen. Im Gegensatz zu anderen Methoden beinhaltet die Elektrolyse das Aufspalten von Wasser (H_2O) in Sauerstoff und Wasserstoff [12]. Derzeit wird das Produkt nach der Direktreduktion zusammen mit einem erhöhten Schrottanteil einem Lichtbogenofen zugeführt, der mit elektrischer Energie Roheisen erzeugt.

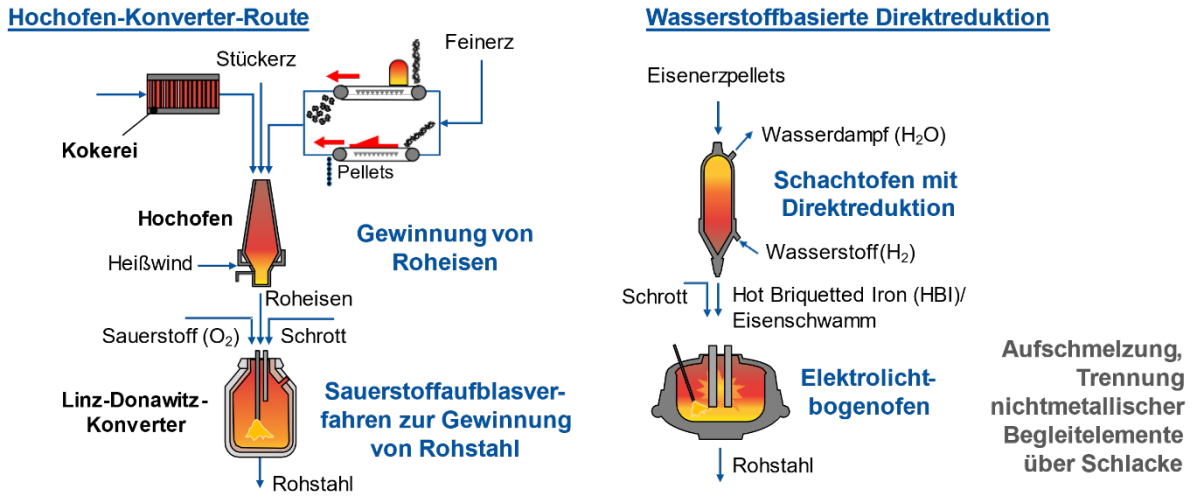


Abbildung 2: Vergleich der Prozessrouten für die Stahlproduktion [13]

Allerdings ist die Umsetzung der wasserstoffbasierten Stahlproduktion auch aufgrund von Faktoren wie den hohen Kosten der Wasserstoffproduktion durch Wasserelektrolyse herausfordernd. Eine Veränderung der Prozesskette für die Roheisenproduktion kann außerdem erhebliche Auswirkungen auf Unternehmen in der Lieferkette haben, da die Veränderung des Herstellungsprozesses potenziell kostenintensive Requalifizierungsmaßnahmen bei OEMs und verarbeitenden Unternehmen mit sich bringen kann. Daher müssen Stahlhersteller nicht nur in neue Ausrüstung und Infrastruktur investieren, sondern auch in neue Ansätze [14], um den Prozess zu skalieren und anzupassen, damit die Qualität des Endprodukts mit den aktuellen Standards konkurrieren kann [15].

2.3 Vermehrte Verwendung von Metallschrott

Während die Einführung der wasserstoffbasierten Stahlproduktion bereits eine Herausforderung darstellt, wird in Industrieländern eine verstärkte Nutzung von Metallschrott diskutiert, um die Abhängigkeit von Rohstoffimporten zu verringern. Basierend auf den neuesten verfügbaren Daten aus dem Jahr 2019 war die EU-28 der weltweit größte exportierende Staatenverbund von Stahlschrott mit einem Exportvolumen von 21,79 Mt, so das

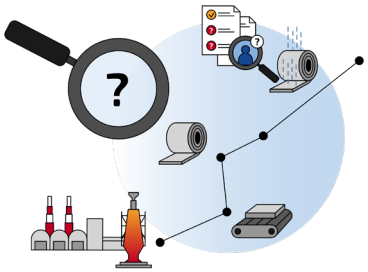
S&P Global Commodity Insights [16]. Deutschland selbst ist eine der größten exportierenden Nationen von Schrottmetallen, hauptsächlich in die EU, die Vereinigten Staaten und China [17]. Die europäische Stahlvereinigung EUROFER ist der Meinung, dass die derzeit exportierten Schrotte innerhalb der EU verarbeitet werden könnten, um den hohen Umweltstandards der EU zu entsprechen [18]. Das Recycling von Stahlschrott bietet die Möglichkeit, die Abhängigkeit von frischen Eisenerz zu reduzieren, die Gesamtproduktionskosten zu minimieren und die CO_2-Emissionen durch zahlreiche Recyclingzyklen erheblich zu reduzieren [19]. Trotz dieser Vorteile war der Einsatz von Schrottmetall laut der Publikation Steel Industry Facts 2020 jedoch begrenzt, wobei nur etwa 30 % des Rohstahls aus Schrott und 70% des Rohstahls aus Eisenerz stammen [10]. Der Einsatz von Schrottmetall in der Stahlproduktion hat das Potenzial, die Nachfrage nach Neu-Stahl zu reduzieren, aber bei steigendem Einsatz stehen der Industrie eine Reihe von Herausforderungen bevor. Für Fertigungsprozesse wie z. B. Tiefziehen wird ein hoher Grad an Reinheit des Flachprodukts benötigt, der beim Einsatz hoher Schrottquoten nicht immer garantiert werden kann [20]. Außerdem gibt es derzeit keine effiziente Lösung dafür, wie Legierungselemente wie Kobalt, Kupfer und Chrom entfernt werden können. Die Kontaminierung durch diese Elemente hat jedoch einen drastischen Einfluss auf die Qualität des resultierenden Flachprodukts.

2.4 Auswirkungen der Trends auf nachfolgende Prozessschritte

Die verstärkte Verwendung von Schrott und die Einführung einer wasserstoffbasierten Herstellungsmethode sind notwendig für den Übergang zu einem ressourcenunabhängigeren und nachhaltigeren Stahlwirtschaft. Beide Trends beeinflussen jedoch die Produktion von hochwertigen Stahlflachprodukten, die derzeit in hohen Mengen mithilfe traditioneller kohlenstoffintensiver Hochofenprozesse hergestellt werden. Der Übergang zu einer grünen Stahlwirtschaft bedeutet für die blechverarbeitende Industrie, dass mit einer Veränderung in der Zusammensetzung und der Einstellung der mechanischen Eigenschaften von Stahlflachprodukten für die Blechverarbeitungslieferkette gerechnet werden muss.

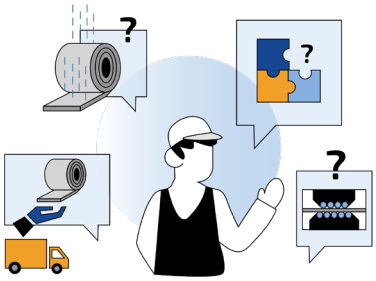
3 Defizite bei der Verwendung von Materialdaten in der Blechverarbeitung

Eine grundlegende Voraussetzung, um wissensbasierte Arbeitsabläufe zu definieren, ist die Quantifizierung von Bezugsgrößen wie der schwankenden Qualität der Blechwerkstoffe. Eine genaue Erfassung der Eigenschaften entlang der Länge des gesamten Flachprodukts, insbesondere für Coils, und eine offene Kollaboration innerhalb der Lieferkette mit diesen Daten hat das Potenzial von einer erfahrungsbasierten in eine wissensbasierte Vorgehensweise überzugehen und kann weitreichende Optimierungspotenziale freisetzen. Aktuell existiert zahlreiche Defizite, welche die Industrie derzeit daran hindert, diese Optimierungspotenziale zu erschließen.



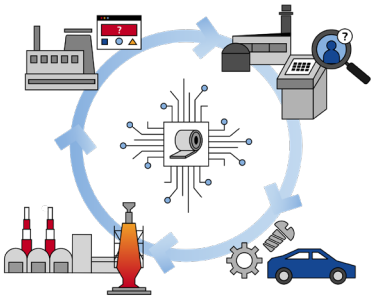
Methodisches Defizit

Fehlende Methodik Heutzutage gibt es strenge Qualitätsbewertungen für jedes gelieferte Coil. Aktuell werden mechanische Eigenschaften am Anfang und Ende des Coils gemessen, jedoch können sich die Eigenschaften je nach Position längs und quer zur Walzrichtung variieren. Diese räumliche Verteilung der mechanischen Eigenschaften des Coils wird derzeit nicht gemessen, da zerstörungsfreie Messverfahren nicht großflächig zur Anwendung kommen, und wenn, dann ohne das Potenzial, die Signale aus den Messverfahren umfassend zu nutzen.



Wissensdefizit

Fehlendes Wissen Das Fehlen von Messgrößen in Länge und Breite des Coils erschwert die Reaktion auf Änderungen der Materialeigenschaften. Hierdurch existiert keine ausreichend genaue Bezugsgröße, aus welcher sich die Parametrierung der Prozessschritte ableiten lässt, welches insbesondere für Umformverfahren mit komplexen Spannungszuständen zutrifft. Dadurch sind die Unternehmen weiterhin auf das Fachwissen erfahrener Mitarbeitenden angewiesen, um Prozesse bei auftretenden Fehlern zu parametrisieren. Dies steigert das Risiko eines Wissensverlusts.



Defizit bei der digitalen Integration

Mangelnde Integration Wenn innerhalb der Lieferketten nur begrenzt Werkstoffdaten ausge-tauscht werden, können Optimierungspotenziale entlang der Lieferkette nur bedingt gehoben werden. Eine vertiefte digitale Integration zur gemeinsamen Nutzung von Daten kann die bedarfsspezifische Herstellung von Stahlprodukten ermöglichen sowie Feedbackschleifen etablieren, welche insgesamt zu einer Optimierung der Stahlprodukte führen.

Im Folgenden werden drei Defizite detailliert diskutiert.

3.1 Methodisches Defizit

Aktuell etablierte Werkstoffprüfverfahren können nicht die benötigte Information zur Auslegung von bestimmten Umformprozessen liefern. Beispielsweise ist der Zugversuch eine gängige Methode zur Bewertung der Materialqualität, jedoch stößt seine Aussagefähigkeit an Grenzen, wenn komplexe Spannungszustände betrachtet werden. Durch die beschränkte Aussagefähigkeit des Tests kann das Materialverhalten unter komplizierteren Spannungsbelastungen nicht vollständig beschrieben werden und ist daher nicht ausreichend für die Auslegung vieler stahlverarbeitenden Prozesse. Selbst eine multiaxiale Zugprüfung kann bei komplexen Prozessen unzureichend sein, da diese nur eine Eigenschaft des Materials von vielen erfasst. Zudem sind solche zerstörenden Materialprüfver-

fahren in Bezug auf den Materialverbrauch ineffizient [21], während der Prozess der Probennahme zu Unsicherheiten führen kann, da die Materialeigenschaften je nach geprüfter Probe variieren können [22].

Gleichzeitig ist der Werkstoff nicht vollständig homogen, wodurch sich seine Eigenschaften unter Umständen vom Anfang zum Ende des Coils verändern. Trotz der strengen Toleranzen, die zur Sicherstellung von Prozessstabilität und Qualität von Blechteilen eingesetzt werden, treten Fluktuationen in den Materialeigenschaften sowohl innerhalb eines als auch zwischen mehreren Coils einer Charge auf [23]. Diese Schwankungen können Defekte, wie z.B. Grat oder Absenkungen in Schneidprozessen, und Rückfederungen bei Biege- oder Umformvorgängen verursachen [21]. Die Ergebnisse solcher Schwankungen sind beispielsweise die Ausmusterung von Bauteilen, Betriebsprobleme und Ausfallzeiten im Blechumformprozess [24]. Für eine effiziente Nutzung von Ressourcen ist es daher notwendig eine umfassendere Bewertung und Quantifizierung der mechanischen Materialeigenschaften zu ermöglichen.

Aufgenommene Sensordaten zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften werden aktuell in ersten Ansätzen schon für die Optimierung von Umformprozessen genutzt. Beim Tiefziehen wird eine flache Metallplatte mit einem starren Werkzeug unter Anwendung von Zug- und Druckkräften in einen hohlen zylindrischen oder konischen Körper geformt. Für dieses Verfahren repräsentiert der Zugversuch realistisches Verhalten des Materials während des Tiefziehprozesses [25]. Heingärtner et al. verwendeten eine mehrdimensionale Regression auf der Grundlage von Wirbelstromdaten zur Berechnung von Materialparametern wie Zugfestigkeit, Streckgrenze, Gleichmaßdehnung und Bruchdehnung bei der Inline-Produktion [26], eben jene Kennwerte, welche sich aus dem Zugversuch bestimmen lassen. Fischer et al. stellten einen wissensbasierten Regelungsansatz für das Tiefziehen vor, der eine sogenannte Feedforward-Regelung auf Basis von Materialmessungen aus einem Wirbelstromsensor und eine Feedback-Regelung auf Basis von Inline-Zugversuchen verwendet, um Einblicke in Materialeigenschaftsschwankungen in industriellen Prozessen zu gewinnen [27]. Heingärtner et al. entwickelten ein intelligentes Steuerungssystem, das numerische Simulationen, Materialdaten aus Wirbelstrom, Prozessdaten und Zugversuche nutzt, um die Produktion von Spülbecken zu optimieren [28]. In Anbetracht der Komplexität der Umformvorgänge wird jedoch das Informationspotenzial dieser Signale derzeit nicht voll ausgeschöpft, da diese nicht nur mit den aus dem Zugversuch gewonnen Kennwerten korrelieren, sondern weitaus mehr Informationen über die Struktur und Eigenschaften des Werkstoffes beinhalten [26].

Anwendungsfall: Beim Feinschneiden handelt es sich um ein Blechtrennverfahren, welches durch seine Funktionsweise oft den Umformverfahren zugeordnet wird. Hier wird ein Stempel und eine Matrize zum Abscheren eines Metallstreifens oder Blechs verwendet, wodurch ein Rohling mit einer flachen Kante und minimalem Grat entsteht. Feinschneiden ist ein komplexes Verfahren, das engere Toleranzen und hohe Präzision zulässt, aber auch erfordert (siehe Abbildung 3). Dies liegt daran, dass beim Feinschneiden das Material im Verformungsbereich in der Nähe der Stanzkante einer dreidimensionalen Druckspannung ausgesetzt ist [29]. Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen ist es schwierig, das Ergebnis mit den derzeit gegebenen Informationen der Datenblätter des gelieferten Coils vorherzusagen und zu kontrollieren. Nach Ansicht von branchenfachkundigen Experten stellen zwei derzeitige Standards Herausforderungen dar: Erstens werden die Materialeigenschaften nur für Proben vom Anfang und Ende eines Coils geprüft, um ein Zerteilen des Coils und infolgedessen kürzere Bandlängen zu vermeiden. Somit kann eine hypothetische Variation der Materialeigenschaften zwischen Anfang und

Ende nicht erkannt werden. Zweitens ist der industrielle Standard zur Bewertung der mechanischen und technologischen Eigenschaften des Coils der uniaxiale Zugversuch und die daraus resultierenden Größen Dehngrenze und Zugfestigkeit [30]. Der uniaxiale Zugversuch stellt jedoch nicht den komplexen Spannungszustand während des Feinschneidens dar, was die Größen unzureichend macht, um die Anlaufzeiten für neues eingehen des Material zu verkürzen und auf Material verursachte Probleme in der Produktion zu reagieren.

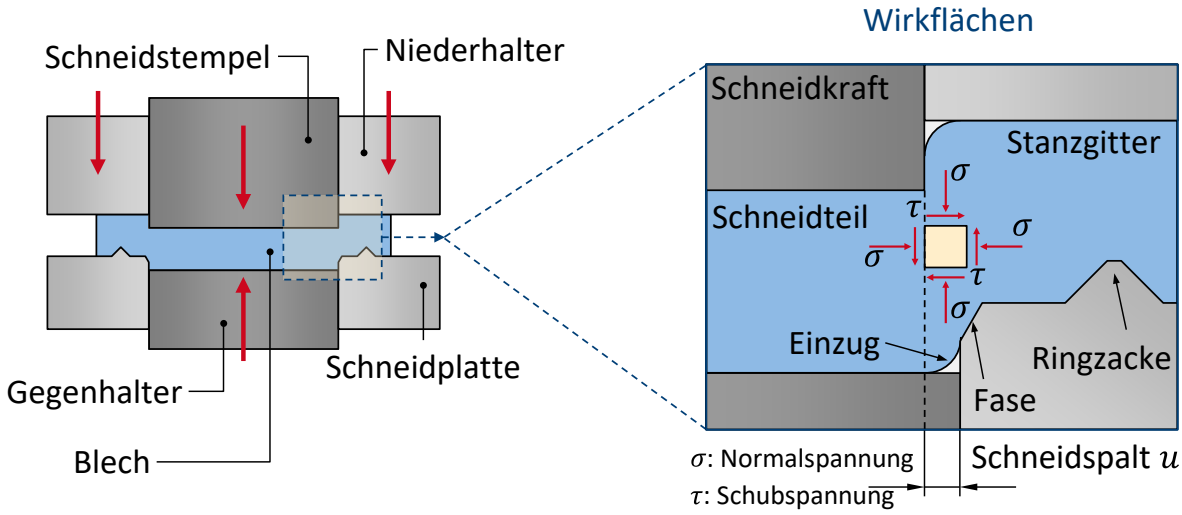


Abbildung 3: Wirkflächen des Feinschneidverfahrens [31]

3.2 Wissensdefizit

Im Gegensatz zu implizitem Wissen gewonnen durch Erfahrung, ermöglicht explizites Wissen eine leichte Übertragbarkeit, da das Wissen explizit in Form von Formeln, Regeln und Tabellen dargestellt werden kann [32]. Die Abhängigkeit von implizitem Erfahrungs-wissen bei der Prozessoptimierung lässt Unternehmen somit anfällig werden für 1. Unsi-cherheiten, die durch technologische Innovationen in der Lieferkette verursacht werden, und 2. den Verlust von Wissen, wenn wichtige Mitarbeitende nicht mehr verfügbar sind, da die Übertragbarkeit von wichtigem Know-How erschwert wird und das derzeit verfüg-bare explizite Wissen oft nicht ausreicht [33].

1. Neues implizites Wissen muss wieder aufgebaut werden, wenn bedeutende Innovationen zu Veränderungen führen und beispielsweise neue Produkte und neue Werkstoffe in ihren Eigenschaften zu stark von vorherigen abweichen. Hierdurch werden Anlaufphasen für die Parametrierung von Prozessen verlangsamt. Da durch die in Kapitel 2 vorgestellten Veränderungen zu einer potenziell starken Veränderung in den Eingangsmaterialen führen kann, ist die Fähigkeit der Herstellenden zur effektiven Anpassung umso wichtiger.
2. Eine übergroße Abhängigkeit von implizitem Wissen in Bereichen, die das Kerngeschäftsmodell des Unternehmens beeinflussen, erhöht das Risiko für Unternehmen Fachwissen durch Ausfall, Abwerbung oder den Ruhestand von Mitarbeitenden (temporär) zu verlieren [34], was in einer Wissenslücke für das Unternehmen resultiert.

Die Nutzung von Materialdaten des aktuell vorhandenen Datenblattes bietet keine explizite Informationesgrundlage der für den Prozess relevanten Werkstoffeigenschaften. Ohne die expliziten Informationen wird auch der Aufbau von explizitem Wissen erschwert.

Dieses Defizit führt zu Verzögerungen bei den Anlaufzeiten und damit zu einer verminderten Wettbewerbsfähigkeit [35]. Darüber hinaus behindert die fehlende Verfügbarkeit einer ganzheitlichen Beschreibung von Materialdaten auch eine fortgeschrittene Zusammenarbeit zwischen Lieferanten und verarbeitende Unternehmen, obwohl eine intensive Zusammenarbeit über Unternehmensgrenzen hinweg ein Schlüsselfaktor für die Wissensbildung in der Fertigung ist [36]. Durch fehlende explizite Informationen zu relevanten Werkstoffeigenschaften ist die Kommunikation darüber, was benötigt wird und welche Eigenschaften zu Problemen in der Fertigung führen, nicht möglich, wodurch spezifische Anforderungen an den Lieferanten nicht kommuniziert werden können.

Anwendungsfall: Beim Feinschneiden wird das Material vor der Bearbeitung durch das Feinschneidwerkzeug eines Richtprozesses unterzogen. Die Parametrisierung des Richt- und Feinschneidprozesses ist komplex und beruht derzeit auf implizitem Wissen, das durch Erfahrung erworben wurde. Die industrielle Praxis zeigt, dass oft und nicht vorhersehbar, wenn ein neues Coil bearbeitet wird, vordefinierte Parametersätze für die Richtmaschine in einem Trial-and-Error-Verfahren für ein bestimmtes Material (auf der Grundlage von implizitem Wissen) verwendet werden. Dies entspricht jedoch häufig nicht den optimierten Einstellungen im Sinne der Produktivität und Nachhaltigkeit. In Fällen, in denen Coils mit denselben Materialspezifikationen und identischen Eigenschaften gemäß dem Datenblatt sich in der Produktion unterschiedlich verhalten, wird der Bedarf an einer höheren Datenauflösung und expliziten Informationsverfügbarkeit deutlich.

3.3 Defizit bei der digitalen Integration

Auch wenn aktuell bereits Sensordaten über die Länge von Coils erhoben werden würden, verhindern nicht vorhandene Voraussetzungen für eine erfolgreiche digitale Integration der Unternehmen entlang der Lieferketten in der Blechverarbeitung die vollständige Nutzung des Potenzials. In Deutschland sind lediglich 49 % der Unternehmen digitalisiert und unternehmensübergreifend vernetzt, davon nur 16 % mit mindestens zwei kooperierenden Unternehmen vernetzt [37]. Den potenziellen Vorteilen eines verstärkten Datenaustauschs und datenbasierter Zusammenarbeit stehen häufig hemmende Risiken gegenüber. Während Unternehmen im Allgemeinen daran interessiert sind, externe Daten zu erhalten, ist die Bereitschaft der Unternehmen, ihre eigenen internen Daten mit anderen zu teilen, noch gering [38]. In einer Studie des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI), bei der 500 in Deutschland ansässige Unternehmen zu ihrer aktuellen Datennutzung und den größten Hindernissen beim Datenaustausch befragt wurden, waren nur etwas mehr als 25% der Unternehmen bereit, ihre Produktdaten und Daten von Zulieferunternehmen zu teilen [39]. Im Folgenden werden jedoch aktuelle industrielle Beispiele für das Defizit an digitaler Integration im Kontext der Metallverarbeitungsindustrie vorgestellt.

Insbesondere der Wandel im automobilen Antriebsstrang hin zur Elektro- oder Wasserstoffmobilität erfordert Anpassungen und Änderungen im Produktportfolio sowie in den zugrunde liegenden Anforderungen/Toleranzen [40]. Dies macht die Abstimmung mit der Lieferkette wichtig, da z. B. Toleranzänderungen wirtschaftliche Konsequenzen haben und kommuniziert bzw. ausgelotet werden müssen. Engere Toleranzen beim Zuliefernden bedeuten jedoch Änderungen sowohl bei der Produkt- und Prozessgestaltung als auch bei der Auswahl von Maschinen und Rohstoffen. Wenn die geforderten Toleranzen aufgrund der fehlenden Kommunikation im Vorfeld nicht korrekt eingehalten werden, erbringen die Produkte nicht die gewünschte Leistung/Funktionalität. Darüber hinaus führen engere Toleranzen zu höheren Kosten aufgrund von Inspektionen, Spezialausrüstun-

gen, höherem Ausschuss oder geringeren Erträgen. In einigen Fällen sind die Werkzeugkosten bei engeren Toleranzen 4–5-mal höher und die Bearbeitungszeiten etwa 10-mal länger als bei breiteren Toleranzen [41].

Nicht nur Form- und Lagetoleranzen spielen eine entscheidende Rolle, sondern auch Nachhaltigkeitsanforderungen von Kunden und Regierungen erfordern den Austausch von Informationen zwischen Unternehmen innerhalb einer Lieferkette. Aufgrund der zahlreichen möglichen Einflussfaktoren auf das zu bilanzierende Produkt, verursacht durch Materialeigenschaften, Abfall, Energie- und Wasserverbrauch usw., werden große Datenmengen von allen Beteiligten einer Lieferkette benötigt. Nur durch die digitale Integration der Primärdaten ist es möglich, eine Ökobilanz von höchster Qualität zu erstellen. An dieser Stelle scheitert die gemeinsame Nutzung von Daten jedoch unter anderem am Vertrauen der beteiligten Parteien. Materialdaten sind oft Geschäftsgeheimnisse und müssen in geeigneter Form aggregiert werden, damit keine Rückschlüsse gezogen werden können. Aber auch Energiedaten müssen sensibel behandelt werden, da sie Aufschluss über die Auslastung und Effizienz eines Unternehmens geben können.

Es fehlt jedoch an der Infrastruktur und den notwendigen Rahmenbedingungen [42], die Vertrauen [43] in die Datensicherheit und Datensouveränität schaffen, damit Unternehmen bereit sind, sich am Datenaustausch zu beteiligen und notwendige Anforderungen von heute erfüllt werden können.

4 Vision einer datengetriebenen Parametrisierung von Prozessen basierend auf Materialdaten

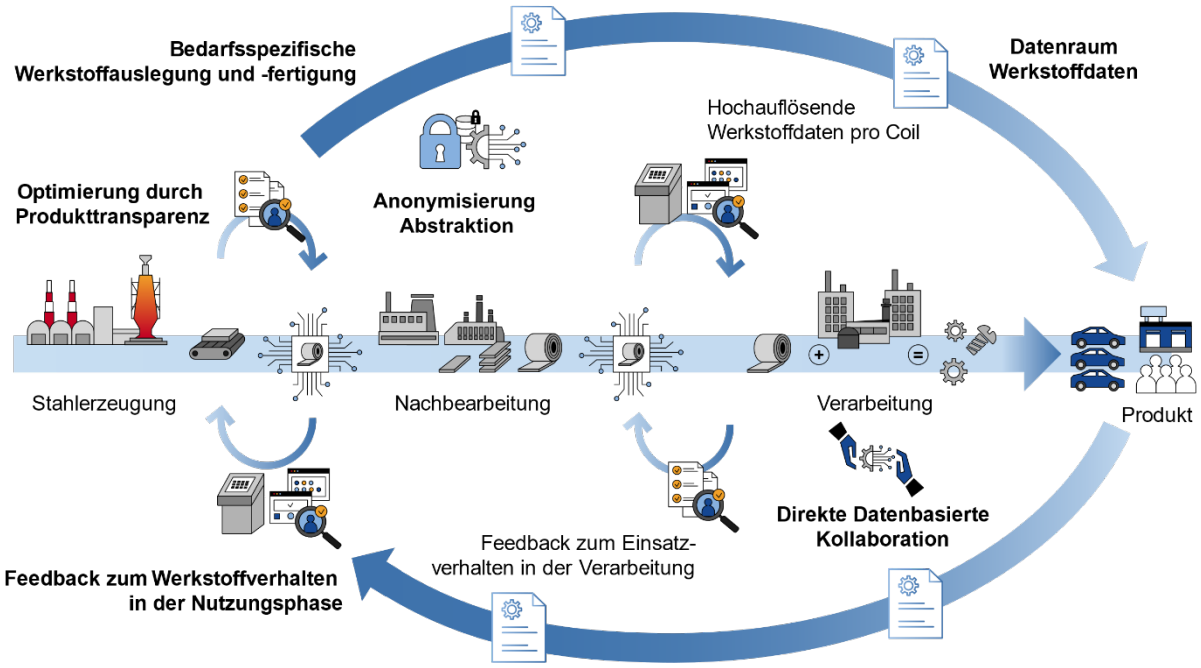


Abbildung 4: Optimierung von Lieferketten durch Materialdatenaustausch

Ansätze für eine Unternehmensübergreifende Nutzung von Werkstoffdaten existieren bereits, beispielsweise mit der Plattform Material Digital [44], jedoch orientiert sich der präsentierte Ansatz stärker am nutzenorientierten Datenaustausch. Im Folgenden werden Ansätze zur digitalen Charakterisierung von Werkstoffen und bisher erzielte Ergebnisse,

Zusammenhänge zwischen Werkstoff, Prozess und Qualitätsdaten als Basis einer möglichen wissensbasierten Prozessparametrierung und aktuelle Initiativen zur digitalen Integration der Lieferkette (siehe Abbildung 4) präsentiert und diskutiert.

4.1 Vision einer datengetriebene Parametrisierung von Prozessen auf Basis von Werkstoffdaten

Wie in Kapitel 3.1 erwähnt, enthalten Signale, beispielsweise aus Wirbelstromprüfgeräten umfassende Informationen zur Beschreibung des Materialverhaltens, jedoch bleibt die Interpretation und Nutzung der Daten eine Herausforderung bei der Gewinnung relevanter Informationen.

Derzeitige Grenzen beim Verständnis von Werkstoffdaten komplexer Sensorik

Als Alternative zu zerstörenden Prüfverfahren wie dem Zugversuch wird die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) eingesetzt, um Werkstoffeigenschaften entlang des Coils zu messen oder zu überwachen, ohne den Werkstoff zu beschädigen. Engel et al. zeigten 1994 das Potenzial der ZfP in der Blechbearbeitung auf [45]. Heute ermöglicht die ZfP eine direkte Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen, wie z. B. Zugfestigkeit oder Bruchdehnung, und kann regelmäßig während der Bearbeitung des Coils durchgeführt werden [26]. Neben der ZfP kann auch die Überwachung der Prozessbedingungen von vorgelagerten Prozessen wie dem Warm- und Kaltwalzen indirekt Aufschluss über die Werkstoffeigenschaften bei der Blechumformung geben [46]. Die Forschung zur Nutzung dieser Daten befindet sich jedoch noch im Experimentierstadium und das Verständnis dieses komplexen und hochdimensionalen Bereichs unterliegt erheblichen Einschränkungen. So liefert beispielsweise eine einzige Messung mit einem Wirbelstromprüfsystem in der Automobilindustrie einen Satz von insgesamt 48 Datenpunkten [47]. Aufgrund der möglichen nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Datenpunkten und bestimmten mechanischen Eigenschaften ist die direkte Korrelation mit den relevanten physikalischen Größen eine Herausforderung. Ein weiteres Beispiel der ZfP ist das System zur Messung des magnetischen Barkhausen-Rauschens, das innerhalb eines Bereichs von mehreren MHz-Frequenzabtastraten gemessen wird [48] und Eigenspannungen erfassen kann, die in der Metallverarbeitung für eine Vielzahl von Fertigungsverfahren relevant sind [49]. Dieses Signal wurde in der Wissenschaft bereits zur Vorhersage von Eigenschaften wie der Härte über die gesamte Länge des Coils verwendet, wobei Deep-Learning-Methoden zur Verarbeitung und Modellierung der Daten bzw. relevanten Kennwerte zum Einsatz kamen [50].

Verringerung der Komplexität

Die beiden obigen Beispiele zeigen, dass Informationen in Signalen zwar vorhanden sind, jedoch die Signale durch ihre Komplexität direkte Rückschlüsse auf mechanische Eigenschaften in relevanten Anwendungsszenarien bisher nicht zulassen. Ein Ansatz ist der Einsatz der Musteranalyse zur Offenlegung der Informationen in den Daten, ohne sie direkt mit mechanischen Eigenschaften in Verbindung zu bringen. Methoden, die die Informationen eines Eingabedatensatzes zu einem Satz von Variablen geringerer Dimension zusammenfassen, können eine abstrakte Perspektive auf die sich ändernden Eigenschaften des Materials ermöglichen. Die Hypothese ist, dass eine Abstrakte Darstellung der Veränderung der Eigenschaften des Blechs ausreicht, um nachfolgenden Prozessschritten hinreichende Referenzwerte zur Einstellung ihrer Prozesse zur Verfügung zu stellen. Die Techniken zur Reduktion der Dimensionalität variieren in ihrer Komplexität von transparenten und einfachen linearen Modellen bis hin zu umfassenden nichtlinearen

Deep-Learning-Ansätzen. Ein Beispiel für ein lineares Modell ist die Hauptkomponentenanalyse (PCA). Sie gilt als etabliertes statistisches Verfahren, bei dem die Dimensionalität großer und komplexer Datensätze reduziert wird, während die wichtigsten Informationen, gemessen an der Varianz des gesamten Datensatzes, erhalten bleiben. So erfassen die Hauptkomponenten die signifikantesten Variationen in den Daten und können für Visualisierungs-, Clustering- und Klassifizierungsaufgaben verwendet werden [51]. Das heißt, eine hierdurch berechnete niedrigdimensionale kombinierte Darstellung der Werkstoffeigenschaften wie Eigenspannungen, Mikrostruktur oder Zugfestigkeit ermöglicht erstmals eine einfache Darstellung, ist jedoch gleichzeitig limitiert durch den unkonkreten Bezug zu physikalischen Größen. Abbildung 5 bietet eine visuelle Darstellung der Schritte der datengetriebenen Zusammenarbeit von Blechliefernden und -verarbeitenden zur Erreichung einer effektiven Prozessparametrierung auf Basis der beschriebenen Vorgehensweise.

Aktuell existiert nur eine geringe Zahl an Arbeiten, welche die variierenden Werkstoffeigenschaften mit der genannten Sensorik darstellen und visualisieren. Obwohl diese Methoden vielversprechend sind, müssen zunächst die Herausforderungen bewältigt werden, um ihr Potenzial voll auszuschöpfen.

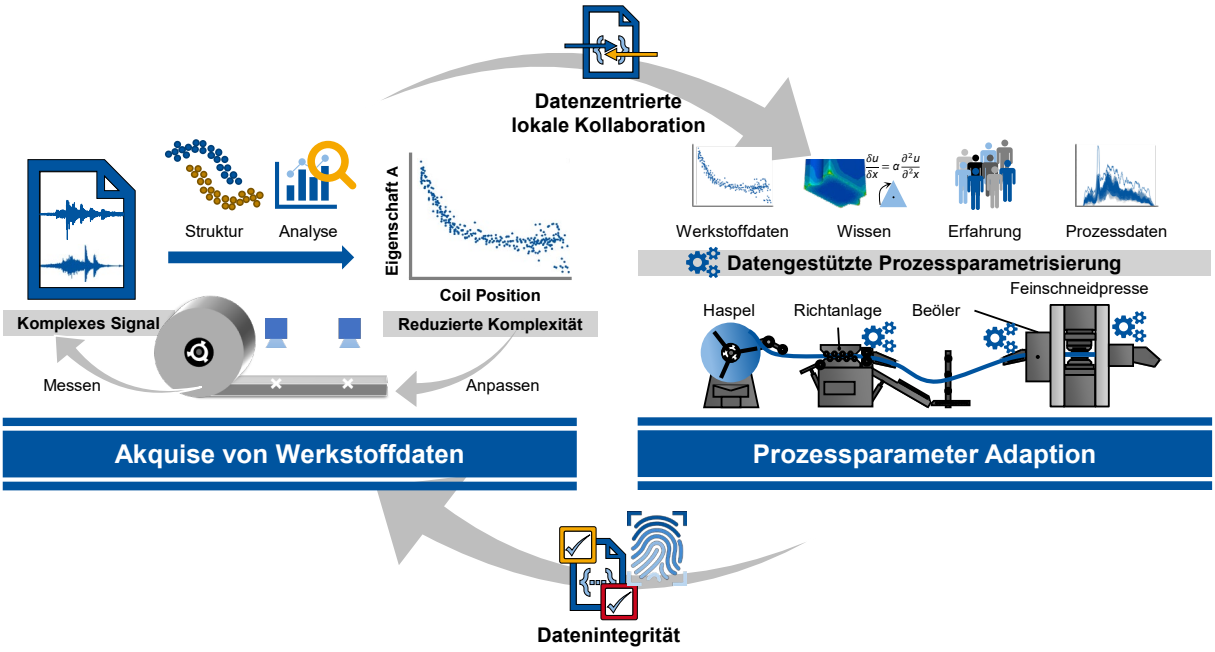


Abbildung 5: Datengetriebene Zusammenarbeit zwischen Blechliefernden (links) und Verarbeitenden (rechts) für eine datengestützte Prozessparametrisierung.

Anwendungsfall: Wirbelstrommessungen und Hauptkomponentenanalyse zur Überwachung der Qualität von kaltgewalztem Kohlenstoffstahl

Das Kaltwalzen ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Herstellung von Stahlblechen mit hohen Qualitätsanforderungen, das häufig als vorgelagertes Verfahren für Feinschneidanwendungen eingesetzt wird. Die Qualität von kaltgewalztem Stahl hängt von mehreren Parametern ab, z. B. von der Zusammensetzung des Stahls, der Temperatur, der Dicke und der Walzgeschwindigkeit. Traditionell wird die Qualität von kaltgewalztem Stahl durch eine zerstörende Prüfung des Endprodukts beurteilt. In Experimenten mit einem Wirbelstrommesssystem wurden Messungen nach dem Kaltwalzprozess in vordefinierten Intervallen durchgeführt. Anschließend wurde das komplexe Signal mittels PCA

in eine zweidimensionale Darstellung transformiert. Es wurde gezeigt, dass sich eine der resultierenden Variablen systematisch in ihrer Verteilung als Funktion der Position in der Länge des Coils ändert, was auf eine starke Korrelation zwischen den Variablen und der Coilposition hinweist. Diese Verteilung zeigt eine nichtlineare Drift der in den Signalen enthaltenen Eigenschaften vom Anfang bis zum Ende des kaltgewalzten Blechmaterials. Das Ergebnis der Studie war, dass die in der PCA sichtbaren Informationen es dem Kaltwalzunternehmen erstmalig ermöglichten, detaillierte Einblicke in seine Prozessergebnisse zu erhalten, ohne das Endprodukt zu Prüfzwecken zu zerstören. Bislang ist jedoch noch nicht bekannt, wie die in der abstrakten Repräsentation sichtbaren Informationen direkt mit den mechanischen Eigenschaften verknüpft werden können.

4.2 Direkte datenbasierte Kollaboration

Innerhalb einer Strategie für den Datenaustausch ist es wichtig zwischen (Roh-)Daten und Informationen zu unterscheiden. Rohdaten an sich haben wenig Wert; sie erhalten erst dann eine Bedeutung, wenn sie von einem Datenanalysesystem verarbeitet und in Informationen umgewandelt werden [52]. Mit den Informationen der Werkstoffeigenschaften in Kapitel 4.1 können Unternehmen ihre Fertigungsprozesse anpassen und so die Effizienz erhöhen [53]. Digitale Zusammenarbeit, bspw. durch den Austausch von hinreichend präzisen Materialdaten zwischen Unternehmen, kann auf zwei grundlegende Vorteile zusammengefasst werden:

Von der Erfahrung zum Wissen

Die Nutzung von Prozesssignalen zur Optimierung und Regelung von Fertigungsprozessen ist ein etablierter Ansatz [54], wobei dem (Eingangs-)Material bzw. Kenntnissen über den Werkstoff ein besonderes Potenzial zugesprochen werden kann, da dessen Beschaffenheit einen signifikanten Einfluss auf den Prozess und die resultierende Qualität hat [55]. In Kapitel 4.1 wurden bereits Sensorsysteme und deren Komplexität zur Messung von Material und Informationsmenge vorgestellt. Ein metallverarbeitendes Unternehmen ist jedoch weder an den Original- und Ausgangssignalen noch notwendigerweise an den tatsächlichen ortsaufgelösten mechanischen Eigenschaftsdaten des zu verarbeitenden Werkstoffs interessiert. Entscheidend ist vielmehr ein Satz von Informationen, welcher als *Orientierungsgröße* zusammen mit dem Wissen im Unternehmen genutzt werden kann, um eine Prozessparametrierung vorzunehmen. Durch einen Austausch und einer Nutzung solcher *anonymisierten Informationen*, die lediglich einen abstrahierten Wert enthalten, wird eine eingeschränkte Transparenz zugunsten des Werkstofflieferanten gewahrt und gleichzeitig die Möglichkeit geschaffen diese Orientierungsgröße als Referenz für Feedback zum Werkstoffverhalten im Einsatz zu nutzen. Dies kann als nutzenorientierter Austausch und als Zusammenarbeit auf Basis von Daten bezeichnet werden.

Mehrwert durch Kollaboration

Durch die Verwendung von abstrakten Werten, die eine selektive Informationsfreigabe ermöglichen, können liefernde Unternehmen sicherstellen, dass ihre Kunden nur die Informationen erhalten, die sie benötigen, um ihre Fertigungsprozesse einzustellen, ohne dabei die Vertraulichkeit ihrer eigenen Produktionsqualität vollständig zu beeinträchtigen. Innerhalb eines iterativen Kollaborationsprozesses können nun Werkstoffzuliefernde und -verarbeitende erarbeiten, wie sich Werkstoffe in den oft langlaufenden Produktgruppen verhalten, sodass mit der Zeit der Sweet-Spot in der Einstellung der Werkstoffeigenschaften mit optimalen Einsatzverhalten in der Fertigung bezogen auf die Orientierungsgröße ermittelt werden kann. In Fällen, in denen ein hohes Maß an Vertrauen zwischen den

Parteien besteht, kann dieser kooperative Ansatz somit ermöglichen, dass Zuliefernde sowohl ihren Kunden die für den Anwendungsfall wichtigsten Informationen zur Verfügung stellen als auch ihre Produkte besser auf die spezifischen Bedürfnisse des Kunden abstimmen.

Der folgende Anwendungsfall präsentiert erste Erkenntnisse, die als Grundlage für eine datengesteuerte Optimierung in der Industrie dienen könnten.

Anwendungsfall: Prozesskette Kaltwalzen – Feinschneiden

Die im Folgenden diskutierte Studie ist eine Fortsetzung des in Kapitel 4.1 vorgestellten Anwendungsfalls im Rahmen des Forschungsprojekts SPAICER (FKZ 01MK20015A). Ziel der Studie war es, die Abhängigkeiten zwischen der Parametrisierung der Richtanlage, den bereitgestellten Daten des kaltgewalzten Werkstoffs und einem Qualitätsmaß der resultierenden Bauteile zu identifizieren. Für die Messung des kaltgewalzten Stahls wurde ein zerstörungsfreies Prüfsystem auf Wirbelstrombasis eingesetzt. Die Ergebnisse zeigten, dass lineare Modelle verwendet werden können, um eine signifikante Beziehung zwischen der Parametrisierung der Richtmaschine, den bereitgestellten Materialdaten und einem Qualitätsmaß der resultierenden Komponenten aufzuzeigen. Diese Erkenntnis legt nahe, dass eine Parametrisierung des Richtprozesses mittels verfügbaren Materialdaten ermöglicht werden kann. Es werden jedoch noch weitere Experimente benötigt, um das Potenzial genauer zu beziffern und die Ergebnisse zu untermauern. Die Ergebnisse dieser Studie begründen die Signifikanz der Zusammenarbeit zwischen dem liefernden Unternehmen von kaltgewalztem Stahl und dem Feinschneidbetrieb zum Verständnisgewinn über den Zusammenhang zwischen Kaltwalzen und Feinschneiden. Um die Vorteile dieser Zusammenarbeit voll ausschöpfen zu können, muss sie jedoch von einer digitalen Integration in der gesamten Lieferkette begleitet werden.

4.3 Digitale Integration von Lieferketten

Der in Kapitel 4.2 vorgestellte Anwendungsfall zeigt, dass die direkte Zusammenarbeit durch einen verstärkten Datenaustausch zwischen zuliefernden und verarbeitenden Unternehmen von Blechen potenziell Vorteile bringen kann. Die Anwendung des Konzepts auf den Datenaustausch innerhalb der gesamten Lieferkette stellt jene jedoch vor größere Herausforderungen bei der Organisation, dem Austausch und dem Schutz von Daten. Bei einer lokalen Zusammenarbeit, beispielsweise zwischen Werkstoffliefernden und -verarbeitenden, können Daten mit einer Vereinbarung und ggf. gewachsenen Vertrauen zwischen zwei direkten Parteien geteilt werden. Das (automatische) Teilen von Daten in einer Gruppe von Parteien verkompliziert die Situation erheblich, insbesondere durch die in Kapitel 3.3 ausgeführten Herausforderungen. Es gibt aber bereits Initiativen zum Datenaustausch, die die Rahmenbedingungen für den Ausbau der digitalen Integration wertschöpfender Unternehmen einer Lieferkette definieren. Die Basis jeglicher Initiativen und Standards für den Datenaustausch in Kooperationsnetzwerken wie einer Lieferkette bilden die International Data Spaces Association e.V. (IDSA) und Gaia-X (s. Abbildung 6), welche daher als grundlegend angesehen und im Folgenden kurz ausgeführt werden:

Die IDSA ist eine industriegetriebene Stiftung, die 2016 gegründet wurde, um einen sicheren Datenraum für die souveräne Verwaltung von Datenbeständen in Unternehmen verschiedener Branchen zu schaffen [56]. Die IDSA hat derzeit mehr als 130 Teilnehmende aus 20 Ländern. Auch die Gaia-X Association arbeitet an einem Konzept für datengetriebene Ökosysteme. Sie wurde im Jahr 2021 gegründet und zählt derzeit 355 Agierende [57]. Die Verbindung zwischen Gaia-X und IDSA basiert auf dem gemeinsamen Wunsch nach Datensouveränität und einem vertrauensbasierten Ökosystem für den

Datenaustausch. In dieser Hinsicht basiert die Infrastruktur von Gaia-X überwiegend auf der Infrastruktur der IDSA. Im Gegensatz zu IDSA führt Gaia-X Konzepte ein, die sich mit der Datenspeicherung und den damit verbundenen Elementen der Cloud beschäftigen. Gaia-X konzentriert sich auf souveräne Cloud-Dienste und Cloud-Infrastruktur, IDSA auf Daten und deren Souveränität. Auch die zugrunde liegenden Vertrauensmodelle sind unterschiedlich. IDSA konzentriert sich auf Gateways für Edge- und Cloud-Anwendungen. Gaia-X hingegen auf Identitäts- und Vertrauensmethoden, die Sicherheitsstufen, Statusverfolgung und Zertifizierungsanwendungen unterstützen.

Auf der Grundlage der beiden vorgestellten Initiativen wurden die so genannten Collaboration Spaces, Manufacturing-X-, Catena-X- und Mobility-Data-Space-Initiativen geschaffen [58]. Während Catena-X speziell die Automobil-Lieferkette betrachtet, versucht Manufacturing-X Ähnliches für unterschiedliche Industriebranchen zu erreichen. Beide Initiativen sind Gaia-X-konforme IDSA-Systeme und arbeiten als offene, kollaborative Ökosysteme, die Standards, Anwendungen, Dienste und Transfer bereitstellen. Der Mobility Data Space ist ein angewandtes Ökosystem auf der Grundlage eines Gaia-X-konformen IDS-Systems für den deutschen Mobilitätssektor.

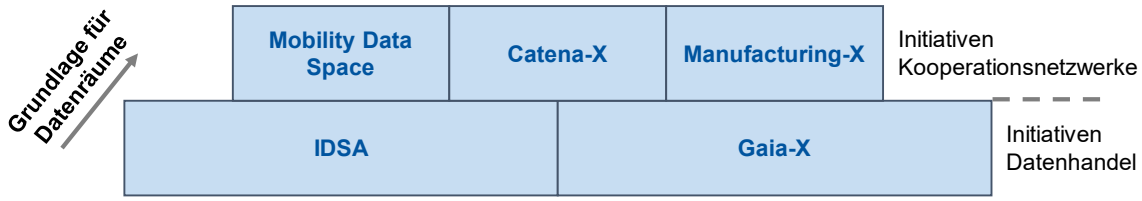


Abbildung 6: Initiativen für Datenräume

In den Initiativen werden die spezifischen Bedenken und Risikofaktoren der gemeinsamen Datennutzung angesprochen und innerhalb der Konsortien bearbeitet. Zu diesen Risiken gehören die Definition von technischen Faktoren wie Struktur, Format, Typen und Inhalt der Daten sowie die Auswahl geeigneter Kommunikationsprotokolle. Derzeit wird die gemeinsame Nutzung von Daten durch fehlende rechtliche Rahmenbedingungen [59], Interoperabilität und die vielen individuellen Insellösungen anstatt der Nutzung allgemeingültiger Standards behindert [60], wodurch höhere Kosten bei der Umsetzung eines Datenaustauschs anfallen [61]. Solange keine Standards für die Speicherung und Strukturierung von Daten existieren, besteht zudem die Unsicherheit inkompatibler Datensätze [42].

5 Quantifizierung der Auswirkungen?

Die Vision der umfassenden Nutzung von Werkstoffdaten entlang der Lieferkette Blech beleuchtet, wie viel Potenzial hinter einer Umsetzung dieser Technologie steckt. Die aktuellen Ergebnisse der beschriebenen Anwendungsfälle in den Kapiteln 4.1 und 4.2 zeigen das Potenzial der Nutzung von ZfP-Messungen für Transparenz der Werkstoffeigenschaften und Prozessoptimierung auf. Dies verdeutlicht, dass mit der Einführung dieser Technologie und einem verstärkten Fokus auf Zusammenarbeit die Nachhaltigkeit und Kosteneffizienz verbessert werden können. Warum zögern die Beteiligten jedoch bei der Implementierung dieser Technologie, auch wenn sie von der Vision überzeugt sind? Hierfür können folgende Gründe genannt werden:

1. **Vertrauen** Direkte Partnerschaften mit langfristigen Beziehungen fördern hohe Vertrauensniveaus, was den Datenaustausch zu einer machbaren und realistischen Praxis macht. Der Datenaustausch entlang der Lieferkette kann eine hohe Wirkung haben, erscheint aber oft für KMUs in der Automobilzulieferkette unmöglich. Viele Unternehmen haben durch vergangene Erfahrungen Vorbehalte, dass eine erhöhte Transparenz in jedweder Ausbaustufe Kunden ermöglicht, bessere Preise auszuhandeln. Damit der Datenaustausch im großen Maßstab Vorteile bringt, müssen Unternehmen jedoch bereit sein, ihre Daten zu teilen, auch wenn sie nicht unmittelbar direkt Vorteile daraus ziehen.
2. **Ressourcen** Die Einführung und Entwicklung innovativer Lösungen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit und Kosteneffizienz erfordern zunehmend eine Zusammenarbeit über traditionelle Kompetenzfelder hinweg. Die Spezialisierung der KMUs steht somit einem erhöhten Bedarf an interdisziplinären Fachwissen gegenüber, was die Zusammenarbeit mit externen Wissensanbietenden, wie Universitäten, zu einer zentralen Aufgabe macht. So erfordert beispielsweise die Einführung digitaler Technologien innovative Hardware, digitale Infrastruktur und Datenkompetenz zur Entwicklung von digitalen Dienstleistungen. Einem blechverarbeitenden Unternehmen, das sich auf die Herstellung von Bauteilen für Automobilanwendungen mit komplexen Geometrien spezialisiert hat, fehlen oft die notwendigen Kompetenzen für die Entwicklung digitaler Lösungen, für das Management der technischen IT-Cloud-Infrastruktur und für die Analyse von Material- und Prozessdaten. Außerdem meiden KMUs die Zusammenarbeit mit IT-Unternehmen zur Entwicklung solcher Services, da die Services den Kern ihres Geschäftsmodells tangieren, oder mit hohen Kosten sowie großen Risiken verbunden sind.
3. **Kosten** Das Risiko verbunden mit der Einführung einer solchen Technologie ist hoch, während die derzeitige Situation der Branche in vielerlei Hinsicht alles andere als sicher und freies Kapital nicht verfügbar ist. Maßnahmen zur Verringerung des finanziellen Risikos und zur Förderung der Zusammenarbeit sind öffentlich finanzierte Forschungsprojekte, bei denen große Konsortien den Unternehmen die Möglichkeit geben, das Know-how von Universitäten und Unternehmen aus anderen Bereichen zu nutzen. Große Projekte mit ausreichender Finanzierung für die Entwicklung solcher Lösungen sind oftmals mit einer erheblichen Zahl an Blindleistungen verbunden. Diese setzen sich aus zahlreichen Sitzungen zur Kommunikation und Abstimmung, buchhalterischen Details und zusätzlichem Arbeitsaufwand zusammen. Dieser Overhead ist zwar überschaubar und mag auch im Sinne von Förderrichtlinien berechtigt sein, für ein mittelständisches Produktionsunternehmen jedoch kann die zusätzliche Kapazität oft nicht ohne Weiteres durch vorhandenes Personal mit Erfahrung im Projektmanagement kompensiert werden. Aus der Sicht eines KMUs kann die Teilnahme an einem öffentlich geförderten Projekt einen Wettbewerbsvorteil darstellen, sie ist aber stets mit einem Kompromiss verbunden, der bei der Planung neuer Projekte und der Aufrechterhaltung des Tagesgeschäfts berücksichtigt werden muss. Und obwohl der Geldbetrag, den die Unternehmen im Rahmen solcher Projekte bereitstellen können, angemessen ist, fällt er im Vergleich zu den umfangreichen Finanzmitteln für Projekte wie Catena-X [62] oder die von der Regierung unterstützte Umstellung auf wasserstoffbasierte Stahlproduktion [63] gering aus.

Das Quantifizierungsdogma in der Nachhaltigkeit

Aktuell ist die Frage nach der Quantifizierung der Nachhaltigkeitsauswirkungen bei der Bewertung von Maßnahmen, die zu einer grünen Wirtschaft beitragen, immer wichtiger. Wie dieser Beitrag zeigt, ermöglicht die Einführung einer ZfP-basierten, kontinuierlichen Werkstoffvermessung für alle kaltgewalzten Coils als einzelne Maßnahme weitreichende Optimierungspotenziale in Bezug auf Energieeinsatz und Ausschussvermeidung. Das ei-gentliche Potenzial von bisher unbekannter Höhe liegt aber in einer verbesserten Zusam-menarbeit zwischen den direkten Partnern und der gesamten Lieferkette. Dieses Poten-zial bietet die Verbesserung der Coil-Qualität sowie die Parametrisierung der Coil-Verar-beitungsprozesse, was wiederum den Ausschuss während der Parametrisierung auf ein Minimum reduzieren kann. Darüber hinaus wird der Übergang von 100 Jahren implizitem oder stillem Erfahrungswissen zu explizitem Wissen, das leicht durch Sprache kommuni-ziert oder in digitalen Services implementiert werden kann, durch die Einführung des dis-kutierten Systems potenziell ermöglicht. Dadurch, dass sich das eigentliche Potenzial nicht direkt aus der einen Maßnahme ergibt, sondern aus einer Reihe an gleichzeitig durchzuführenden Maßnahmen und Paradigmenwechseln, ist eine Quantifizierung der Auswirkungen komplex und insbesondere für KMUs schwer einzuschätzen. Zudem liegt derzeit der Schwerpunkt vor allem auf der Reduzierung der Kohlenstoffemissionen, wäh-rend andere Ziele für eine nachhaltige Wirtschaft noch schwieriger zu berücksichtigen und zu bewerten sind.

Gleichzeitig kann von Unternehmen nicht erwartet werden, dass sie ausschließlich im Sinne der Nachhaltigkeit handeln, wenn sich aktuell ein bedeutender Teil des Status quo in der Branche kurz- bzw. mittelfristig disruptiv verändert. Diese Entwicklung beeinträch-tigt bestehende Geschäftsmodelle, da sich beispielsweise die benötigten Komponenten für die diversen zukünftigen Antriebsstränge verändern, wobei sich parallel der Input der Lieferkette durch Innovationen in der Stahlproduktion verändert. Dieser Beitrag be-schreibt zwar notwendige Maßnahmen mit ihren Auswirkungen, jedoch kann die unter-nehmerische Entscheidung, sie "einfach zu tun", weder auf der Quantifizierung der Aus-wirkungen auf die Nachhaltigkeit beruhen noch auf den geschätzten monetären Auswir-kungen, da der Arbeitsaufwand für die Bewertung der Auswirkungen die für diese Ent-scheidung verfügbaren Kapazitäten übersteigt. Stattdessen müssen und werden Innova-tionsentscheidungen unter Berücksichtigung der persönlichen Verantwortung für die Nachhaltigkeit der Produktion und der gesamten Wirtschaft vom Gespür der Entschei-dungstragenden in KMUs in Situationen mit hohen Unsicherheiten und Risiken getroffen. Dieser Schlüsselfaktor bzw. diese Qualifikation war in der Geschichte der deutschen In-dustrie von entscheidender Bedeutung und wird auch für die Bewältigung der Herausfor-derungen des grünen Wandels erforderlich sein.

6 Literatur

[1] „Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015: Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development," UN General Assembly, 2015. Zugriff am: 29. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html

[2] R. B. Swain und S. Ranganathan, „Modeling interlinkages between sustainable development goals using network analysis," *World Development*, Jg. 138, Art.-Nr. 105136, 2021. doi: 10.1016/j.worlddev.2020.105136.

[3] M. Gehring, A. Weill und M. Riemer. „Global Automotive Study 2022: Consumer preferences, purchasing behaviors and attitudes towards technological change." simon-kucher.com. https://www.simon-kucher.com/sites/default/files/2022-02/Brochure_Automotive-Study-2022.pdf (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[4] S. Lindner, „Application of Innovative Material Concepts for Safety Lightweight Inside Cars Using Alternative Powertrains," in *Technologies for economical and functional lightweight design: Conference proceedings 2018*, K. Dröder und T. Vietor, Hg., 2019, S. 175–187, doi: 10.1007/978-3-662-58206-0_17.

[5] T. Bell. „The Modern Steel Manufacturing Process – Removing Carbon From Iron Creates Steel." thoughtco.com. https://www.thoughtco.com/steel-production-2340173 (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[6] Statista Research Department. „Number of employees in leading steel industries in the European Union in 2021." de.statista.com. https://www.statista.com/statistics/640341/steel-industry-employment-european-countries/ (Zugriff am: 24. Feb. 2023).

[7] Statista Research Deparment. „Treibhausgasemissionen der deutschen Stahlindustrie* in den Jahren 1995 bis 2020 (in 1.000 Tonnen CO2-Äquivalent)." de.statista.com. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/476860/umfrage/treibhausgasemissionen-der-deutschen-stahlindustrie/ (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[8] „Greenhouse Gas Emissions in 2020 – Executive Summary: Stationary installations and aviation subject to emissions trading in Germany (2020 VET report)," German Emissions Trading Authority (DEHSt) at the German Environment Agency, 2021. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/EN/publications/2020_VET-Report_summary.pdf?__blob=publicationFile&v=3

[9] Statista Research Deparment. „Energiebedingte Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektor im Jahr 2022 (in Millionen Tonnen CO2-Äquivalent)." de.statista.com. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/312450/umfrage/treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-quellgruppe/ (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[10] „Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland: 2020," Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2020. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2020_rz_neu_Web1.pdf

[11] R. Bartos, S. Brockmann, R. Fandrich, G. Endemann und S. Heinzel, *Stahlfibel*. Düsseldorf: Stahleisen, 2015.

[12] O. Wallach. „Green Steel: Decarbonising with Hydrogen-Fueled Production." visualcapitalist.com. https://www.visualcapitalist.com/sp/green-steel-decarbonising-with-

hydrogen-fueled-production/#:~:text=The%20green%20steel%20method%20instead,C)%2C%20saving%20energy%20costs (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[13] Stahlinstitut VDEh. „Kohlenstoffbasierte Stahlerzeugung.“ vdeh.de. https://vdeh.de/stahlherstellung/kohlenstoffbasierte-stahlerzeugung/ (Zugriff am: 29. Mär. 2023).

[14] W. Sun, Q. Wang, Y. Zhou und J. Wu, „Material and energy flows of the iron and steel industry: Status quo, challenges and perspectives,“ *Applied Energy*, Jg. 268, Art.-Nr. 114946, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114946.

[15] C. Hoffmann, M. Van Hoey und B. Zeumer. „Decarbonization challenge for steel: Hydrogen as a solution in Europe.“ mckinsey.com. https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Industries/Metals%20and%20Mining/Our%20Insights/Decarbonization%20challenge%20for%20steel/Decarbonization-challenge-for-steel.pdf (Zugriff am: 24. Feb. 2023).

[16] D. Kinch. „EU scrap metal export curbs would be backwards step in global decarbonization: BIR.“ spglobal.com. https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/metals/052322-eu-scrap-metal-export-curbs-would-be-backwards-step-in-global-decarbonization-bir (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[17] Trading Economics. „Germany Exports of Scrap & Waste from Iron & Steel.“ tradingeconomics.com. https://tradingeconomics.com/germany/exports-of-scrap-waste-from-iron-steel (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[18] D. Kinch. „EU steelmakers welcome parliamentary vote to restrict scrap steel, metal exports.“ eurometal.net. https://eurometal.net/eu-steelmakers-welcome-parliamentary-vote-to-restrict-scrap-steel-metal-exports/ (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[19] M. Sahoo, S. Sarkar, A. C. R. Das, G. G. Roy und P. K. Sen, „Role of Scrap Recycling for CO2 Emission Reduction in Steel Plant: A Model Based Approach,“ *Steel research international*, Jg. 90, Nr. 8, Art.-Nr. 1900034, 2019, doi: 10.1002/srin.201900034.

[20] G. Balachandran, „Challenges in Special Steel Making,“ *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Jg. 314, Art.-Nr. 12016, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/314/1/012016.

[21] B. Heller, S. Chatti, M. Schikorra, A.E. Tekkaya und M. Kleiner, „Blechbiegen,“ in *Blechumformung: Verfahren, Werkzeuge und Maschinen* (VDI-Buch), K. Siegert, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2015, S. 141-221.

[22] „Measurement uncertainty arising from sampling: A guide to methods and approaches: Second Edition 2019: Produced jointly with Eurolab, Nordtest, and RSC Analytical Methods Committee,“ M. H. Ramsey, S. L. R. Ellison und P. Rostron, Hg., 2019. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/UfS_2019_EN_P2.pdf

[23] V. Sturm, „Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen,“ Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg, 2013, doi: 10.25593/978-3-87525-357-3.

[24] L. Ortjohann, M. Becker, P. Niemietz und T. Bergs, „Monitoring of fluctuating material properties for optimizing sheet-metal forming processes: A systematic literature review,” in *Material Forming: The 26th International ESAFORM Conference on Material Forming: – ESAFORM 2023 –: held in Kraków, Poland, April 19-21, 2023*, L. Madej, M. Sitko und K. Perzynski, Hg., 2023, S. 2071-2080, doi: 10.21741/9781644902479-222.

[25] *DIN 8584-3:2003-09, Fertigungsverfahren Zugdruckumformen - Teil 3: Tiefziehen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, 8584-3:2003-09, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2003.

[26] J. Heingärtner, M. Born und P. Hora, „Online Acquisition of Mechanical Material Properties of Sheet Metal for the Prediction of Product Quality by Eddy Current," in *ECNDT 2010 - 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7-11*, 2010. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ndt.net/?id=9045

[27] P. Fischer, D. Harsch, J. Heingärtner, Y. Renkci und P. Hora, „A knowledge-based control system for the robust manufacturing of deep drawn parts," *Procedia Engineering*, Jg. 207, S. 42–47, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.735.

[28] J. Heingärtner, P. Fischer, D. Harsch, Y. Renkci und P. Hora, „Q-Guard – an intelligent process control system," *Journal of Physics: Conference Series*, Jg. 896, Art.-Nr. 12032, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/896/1/012032.

[29] Q. Zheng, X. Zhuang und Z. Zhao, „State-of-the-art and future challenge in fine-blanking technology," *Production Engineering*, Jg. 13, Nr. 1, S. 61–70, 2018, doi: 10.1007/s11740-018-0839-7.

[30] B. Aydemir, „The Changes in ISO 6892-1:2016 Metallic Materials Tensile Testing Standard," in *3rd Iron and Steel Symposium(UDCS'17)3-5April 2017 Karabuk-TURKEY*, 2017. Zugriff am: 12. Apr. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/Bulent-Aydemir-2/publication/318030558_The_Changes_in_ISO_6892-12016_Metallic_Materials_Tensile_Testing_Standard/links/5955dc30aca272fbb379d708/The-Changes-in-ISO-6892-12016-Metallic-Materials-Tensile-Testing-Standard.pdf?origin=publication_detail

[31] I. F. Weiser, R. Mannens, A. Feuerhack, D. Trauth und T. Bergs, „An analytical approach for the determination of the temperature distribution in the cross section of a sheet metal caused by inductive heating," *Procedia Manufacturing*, Jg. 29, S. 353–360, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.148.

[32] M. Polanyi, „Chapter 7 - The Tacit Dimension," in *Knowledge in Organizations* (Resources for the Knowledge-Based Economy 2), L. Prusak, Hg., Newton: Butterworth-Heinemann, 1997, S. 135–146, doi: 10.1016/B978-0-7506-9718-7.50010-X.

[33] M. Liewald *et al.,* „Perspectives on data-driven models and its potentials in metal forming and blanking technologies," *Production Engineering*, Jg. 16, Nr. 5, S. 607–625, 2022, doi: 10.1007/s11740-022-01115-0.

[34] B. C. O'Neill *et al.,* „Demographic change and carbon dioxide emissions," *The Lancet*, Jg. 380, Nr. 9837, S. 157-164, 2012, doi: 10.1016/S0140-6736(12)60958-1.

[35] A. Osarenkhoe und M. B. Komunda, „Redress for Customer Dissatisfaction and Its Impact on Customer Satisfaction and Customer Loyalty," *Journal of Market Development and Competitiveness*, Jg. 7, Nr. 2, S. 102–114, 2013. [Online]. Verfügbar unter: http://www.na-businesspress.com/JMDC/OsarenkhoeA_Web7_2_.pdf

[36] C. Wu, „Knowledge creation in a supply chain," *Supply Chain Management*, Jg. 13, Nr. 3, S. 241–250, 2008, doi: 10.1108/13598540810871280.

[37] A. Icks, C. Schröder, S. Brink, C. Dienes und S. Schneck, „Digitalisierungsprozesse von KMU im Produzierenden Gewerbe," (IfM-Materialien 255) Institut für Mittelstandsforschung (IfM) Bonn, Bonn, 2017. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ifm-bonn.org/fileadmin/data/redaktion/publikationen/ifm_materialien/dokumente/IfM-Materialien-255_2017.pdf

[38] H. Richter und P. R. Slowinski, „The Data Sharing Economy: On the Emergence of New Intermediaries," *IIC - International Review of Intellectual Property and Competition Law*, Jg. 50, Nr. 1, S. 4–29, 2019, doi: 10.1007/s40319-018-00777-7.

[39] K.-H. Röhl, L. Bolwin und P. Hüttl, „Datenwirtschaft in Deutschland: Wo stehen die Unternehmen in der Datennutzung und was sind ihre größten Hemmnisse?," Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI), Köln, 2021. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Gutachten/PDF/2021/Hemmnisse_der_Datenwirtschaft_Studie.pdf

[40] A. Herlt, P. Jana, M. Kellner, S. Küchler und H. Rochlitz. „Smartphones on wheels: New rules for automotive-product development." mckinsey.com. https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/smartphones-on-wheels-new-rules-for-automotive-product-development (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[41] RD8. „Impact of tolerances in design - example." rd8.tech. https://rd8.tech/resources/impact-of-tolerances-in-design-example/ (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[42] B. Rohleder. „Datenökonomie – Wo steht die deutsche Wirtschaft?" bitkom.org. https://www.bitkom.org/sites/main/files/2022-05/Bitkom-Charts_Daten%C3%B6konomie_04_05_2022_final.pdf (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[43] C. Rammer *et al.*, „Herausforderungen beim Einsatz von Künstlicher Intelligenz: Ergebnisse einer Befragung von jungen und mittelständischen Unternehmen in Deutschland," Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin, 2021. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Digitalisierungsindex/Publikationen/publikation-download-ki-herausforderungen.pdf?__blob=publicationFile&v=1

[44] Karlsruher Institut für Technologie. „MaterialDigital: Die Plattform für die Digitalisierung von Materialien." materialdigital.de. https://www.materialdigital.de/ (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[45] U. Engel, M. Schwind und S. Stancu-Niederkorn, „New Applications of Non-Destructive Testing in Metal Forming Technology," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Jg. 208, Nr. 4, S. 259-267, 1994, doi: 10.1243/PIME_PROC_1994_208_087_02.

[46] J. Chen und Z. Fan, „An intelligent online detection approach based on big data for mechanical properties of hot-rolled strip," *International Journal of Modelling, Identification and Control*, Jg. 37, Nr. 2, S. 106–112, 2022, doi: 10.1504/IJMIC.2021.120210.

[47] Institut Dr. Foerster. „Automobilindustrie: Prozessintegrierte Qualitätssicherung metallener Komponenten." foerstergroup.de. https://www.foerstergroup.de/fileadmin/user_upload/downloads/Broschueren/FOERSTER_Automobilindustrie.pdf (Zugriff am: 24. Feb. 2023).

[48] M. Deveci. „The Properties of Barkhausen Noise." stresstech.com. https://www.stresstech.com/wp-content/uploads/2020/08/properties-of-barkhausen-noise.pdf (Zugriff am: 28. Feb. 2023).

[49] A. Sorsa, K. Leiviskä, S. Santa-aho und T. Lepistö, „Quantitative prediction of residual stress and hardness in case-hardened steel based on the Barkhausen noise measurement," *NDT & E International*, Jg. 46, S. 100–106, 2012, doi: 10.1016/j.ndteint.2011.11.008.

[50] M. Unterberg, J. Stanke, D. Trauth und T. Bergs, „A time series classification approach to non-destructive hardness testing using magnetic Barkhausen noise emission," *Production Engineering*, Jg. 15, Nr. 3-4, S. 509–517, 2021, doi: 10.1007/s11740-021-01034-6.

[51] S. Wold, K. Esbensen und P. Geladi, „Principal component analysis," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Jg. 2, Nr. 1-3, S. 37-52, 2013, doi: 10.1016/0169-7439(87)80084-9.

[52] M. Frické, „The knowledge pyramid: a critique of the DIKW hierarchy," *Journal of Information Science*, Jg. 35, Nr. 2, S. 131–142, 2008, doi: 10.1177/0165551508094050.

[53] J. Ling, M. Hutchinson, E. Antono, S. Paradiso und B. Meredig, „High-Dimensional Materials and Process Optimization Using Data-Driven Experimental Design with Well-Calibrated Uncertainty Estimates," *Integrating Materials and Manufacturing Innovations*, Jg. 6, Nr. 3, S. 207–217, 2017, doi: 10.1007/s40192-017-0098-z.

[54] G. Chryssolouris, M. Domroese und P. Beaulieu, „Sensor Synthesis for Control of Manufacturing Processes," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Jg. 114, Nr. 2, S. 158–174, 1992, doi: 10.1115/1.2899768.

[55] M. Unterberg, P. Niemietz, D. Trauth, K. Wehrle und T. Bergs, „In-situ material classification in sheet-metal blanking using deep convolutional neural networks," *Production Engineering*, Jg. 13, Nr. 6, S. 743–749, 2019, doi: 10.1007/s11740-019-00928-w.

[56] Bayard Consulting. „GS1 Global Data Synchronisation Network." b-synced.io. https://b-synced.io/gs1-gdsn-produktinformationen/ (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[57] Gaia-X European Association for Data and Cloud AISBL. „Members Directory." gaia-x.eu. https://gaia-x.eu/membership/members-directory/ (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[58] Catena-X Automotive Network. „Catena-X: Building the First Operating System for a Data Driven Value Chain." catena-x.net. https://catena-x.net/fileadmin/user_upload/Vereinsdokumente/Catena-X_Im_UEberblick.pdf (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

[59] M. Lindner, S. Straub und B. Kühne, „How to Share Data? Data-Sharing-Plattformen für Unternehmen: Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm "Smarte Datenwirtschaft"," Institut für Innovation und Technik (iit), Berlin, 2021. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iit-berlin.de/wp-content/uploads/2021/04/SDW_Studie_DataSharing_ES-1.pdf

[60] A. Krotova, „Europäischer Daten(T)raum. Was deutsche Unternehmen an einem Datenaustausch hindert," (IW-Kurzbericht 14/2020) Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Köln, 2020. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Kurzberichte/PDF/2020/IW-Kurzbericht_2020_Europaeischer_Datentraum.pdf

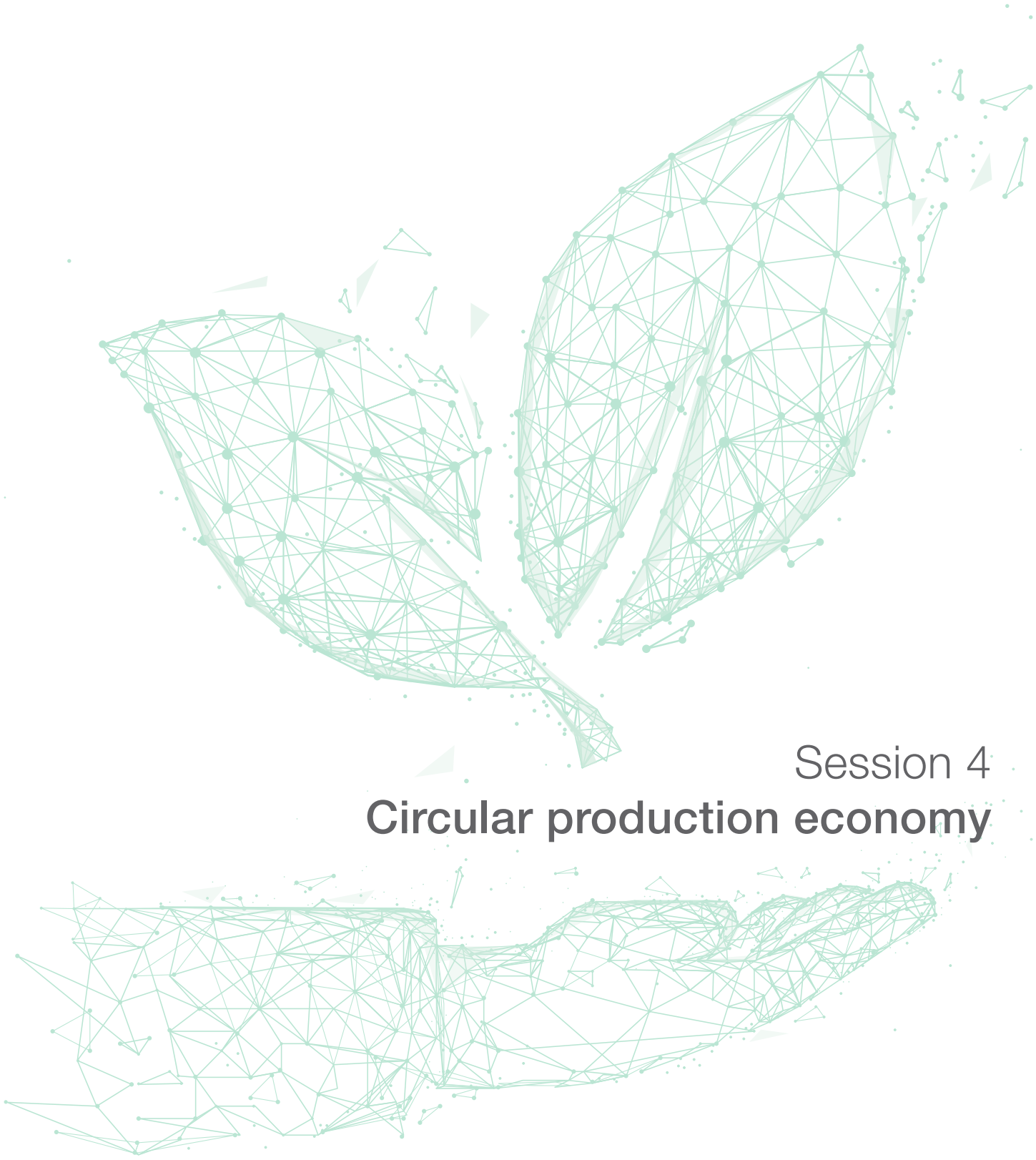
[61] „SMART 2020/694 | D2: Impact Assessment on enhancing the use of data in Europe: Report on Task 1 - Data Governance," European Commission, Brüssel, 2020. Zugriff am: 23. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.astrid-online.it/static/upload/stud/studysupportingtheimpactassessmentpdf.pdf

[62] C. Dörr-Voß. „Schriftliche Frage an die Bundesregierung im Monat September 2021: Frage Nr. 294." bmwk.de. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Parlamentarische-Anfragen/2021/09/9-294.pdf?__blob=publicationFile&v=4#:~:text=Zum%201.,befinden%20sich%20in%20der%20Antragsphase (Zugriff am: 1. Mär. 2023).

[63] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. „ProDRI - Industrielle Produktion von direktreduziertem Eisen (DRI) auf Basis von Erdgas und/oder Wasserstoff.“ bmuv.de. https://www.bmuv.de/projekt/prodri-industrielle-produktion-von-direktreduziertem-eisen-dri-auf-basis-von-erdgas-und-oder-wasserstoff (Zugriff am: 1. Mär. 2023).

Die Inhalte für den Vortrag 3.3 erarbeiteten die Autor:innen mit weiteren Expert:innen in dieser Arbeitsgruppe:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen
Daria Gelbich, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Jens Gerhard, Feintool System Parts Jena GmbH, Jena
Tobias Kaufmann, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Johannes Mayer, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Jiyoung Moon, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Philipp Niemietz, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Lucia Ortjohann, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Andreas Peters, Mendritzki Holding GmbH & Co. KG, Plettenberg
Frank Seiferth, Seitec GmbH, Königsee
Martin Unterberg, WZL | RWTH Aachen University, Aachen



Session 4

Circular production economy

4.1 Ordnungsrahmen für eine zirkuläre Produktionswirtschaft

G. Schuh, S. Schmitz, G. Lukas, L. Niwar, M. Welsing, R. Calchera

Gliederung

1 Einleitung 306
2 Wertsteigernde Kreislaufwirtschaft 309
3 Framework for Circular Production Economy 312
4 Handlungsfeld: Produktarchitektur 316
5 Handlungsfeld: Innovationsstrategie 319
6 Handlungsfeld: Geschäftsmodell 321
7 Handlungsfeld: Wertschöpfungsstrategie 323
8 Befähiger: KI-basiertes Lifecycle Management 325
9 Zusammenfassung 329
10 Literatur 330

doi: 10.24406/publica-967

Kurzfassung

Ordnungsrahmen für eine zirkuläre Produktionswirtschaft

Die wertsteigernde Kreislaufwirtschaft ist ein nachhaltiges Konzept für die Produktion von Produkten. Ein zentraler Aspekt der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft ist die Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks. Gleichzeitig ermöglicht die erfolgreiche Umsetzung des Konzepts auch eine Zielerfüllung in den Dimensionen der Wirtschaftlichkeit und Innovation. Eine konsequent ausgerichtete wertsteigernde Kreislaufwirtschaft eliminiert die ökologisch negativen Konsequenzen der Produktion und erhöht die Wertschöpfung und Profitabilität der beteiligten Unternehmen langfristig. Der vorliegende Beitrag motiviert und erklärt das Konzept der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft. Zudem wird ein Framework präsentiert, welches Unternehmen bei der Transformation unterstützt. Dafür werden sowohl die Produktarchitektur, das Geschäftsmodell sowie die Innovations- und Wertschöpfungsstrategie von den Paradigmen der etablierten, linearen Wirtschaft gelöst und auf eine Wertsteigerung und Langlebigkeit ausgerichtet. Damit alle Stakeholder die zur Partizipation notwendigen Informationen abrufen können, wird der digitale Schatten im Internet of Sustainable Production als Basis für die Realisierung mit eingebunden. Für den verlängerten Produktlebenszyklus fungiert zudem eine digitale Produktakte als digitaler Schatten, in dem alle relevanten Informationen gebündelt und aggregiert werden.

Schlagwörter: Wertsteigernde Kreislaufwirtschaft, Produktion, Upgrade, Framework

Abstract

Framework for Circular Production Economy

The value-enhancing circular economy is a concept for the sustainable production of Goods. A central aspect of the value-enhancing circular economy is the reduction of the ecological footprint. At the same time, successful implementation of the concept supports accomplishing of targets in the dimensions of economic efficiency and innovation. A consistently aligned upgrade circular economy eliminates the ecologically negative consequences of production and increases the long-term value creation and profitability of the companies involved. This paper motivates and explains the concept of the upgrade circular economy. In addition, a framework is presented that supports companies in the transformation process towards it. For this purpose, the product architecture, the business model as well as the innovation and value creation strategy are detached from the paradigms of the established linear economy and oriented towards value enhancement and longevity. In order to ensure that all stakeholders have access to the information required for their participation, the digital shadow in the Internet of Sustainable Production is necessary. For the extended product life cycle, a digital product file acts as a digital shadow, bundling and aggregating all relevant information.

Keywords: Value-enhancing Circular Economy, Production, Upgrade, Framework

1 Einleitung

Klimawandel, Biodiversitätsverlust und vermehrte globale Verschmutzung stellen wesentliche Herausforderungen für die Gesellschaft dar. Sie beeinflussen das ökologische Gleichgewicht der Erde und riskieren damit die Lebensgrundlage der aktuellen und zukünftigen Bewohner [1]. Um die Chancen der kommenden Generationen nicht zu gefährden, ist es unumgänglich, dass schnell beständige Lösungen für diese Bedrohungen gefunden werden.

In der Auseinandersetzung mit dem Klimawandel spielt die Produktion eine zentrale Rolle. Gründe dafür sind mit der Produktion verbundene Effekte wie Ressourcenverbrauch, Abfallmengen, Umweltverschmutzung und Treibhausgasemissionen. Gase wie Kohlenstoffdioxid, Methan und Fluorchlorkohlenwasserstoffe haben eine direkte Auswirkung auf den globalen Treibhauseffekt. Als direkter Treiber des Temperaturanstiegs der Erde stehen Treibhausgasemissionen daher im politischen Fokus. Um dem angestrebten 1.5°C Ziel des Pariser Klimaabkommens gerecht zu werden, müssen die globalen CO_2 Emissionen als Versucher des Klimawandels gesenkt werden [2]. Allein durch den Energiebedarf von Produktion und Logistik entstehen weltweit über 40% der CO_2 Emissionen [3]. Eine Reduktion von Treibhausgasen in Produktionsprozessen und Transport ist somit nicht nur wünschenswert, sondern unabdingbar. Treibhaugasemissionen sind nicht die einzigen negativen Auswirkungen, die im Produktionssektor entstehen. Der steigende Konsum von limitierten Ressourcen führt zwangsläufig in eine Knappheit. Produzierende Unternehmen müssen folglich Lösungen bieten, um mit der steigenden Ressourcenknappheit umzugehen.

Eine der Herausforderungen für Unternehmen bei der Herstellung und Vermarktung von ganzheitlich nachhaltigen (ökologisch, ökonomisch und sozial) Produkten besteht darin, dass viele Kunden zwar Interesse an umweltfreundlichen oder ethisch produzierten Produkten haben, jedoch nicht bereit sind, einen höheren Preis dafür zu zahlen. Obwohl viele Verbraucher das Bewusstsein für Umweltfragen erhöht haben und ein Interesse an nachhaltigen Produkten haben, ist für viele der Preis ein ausschlaggebendes Kriterium bei der Kaufentscheidung [4]. Um diese Herausforderung zu bewältigen, müssen Unternehmen Wege finden, um die Produktionskosten für nachhaltige Produkte zu senken und die Wahrnehmung der Kunden über die Bedeutung von Nachhaltigkeit zu verändern. Deshalb sind oft Kosteneinsparungen ein Hauptmotivation für Maßnahmen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit und weniger der tatsächliche Willen für mehr Umweltschutz [5]. Mittlerweile stellt sich jedoch die Frage, inwiefern ein klassisches Produktionsmodell langfristig noch profitabel ist. Energie-, Rohstoff- und Vormaterialpreise sind aufgrund globalpolitischer und sicherheitskritischer Ereignisse gestiegen, werden aber aufgrund von Vertragsbindungen, Wettbewerbsdruck oder geringer Zahlungsbereitschaft der Kunden nicht direkt an diese weitergegeben. Im Jahr 2022 haben verarbeitende Gewerbe nur 50% ihrer gestiegenen Kosten weiter gegeben [6]. Mangelt es Unternehmen an Möglichkeiten ihre entstandenen Kosten zu decken, gefährdet dies essenziell ihre Geschäftsgrundlage. Preissteigerungen aufgrund kurzfristiger Turbulenzen stellen dabei einen Ausblick auf die langfristige Situation für Unternehmen dar. Die Preise werden aufgrund von begrenzten Rohstoffverfügbarkeiten weiter steigen [7]. Deshalb benötigt die produzierende Industrie neue Lösungen, um existierende Ressourcen in Kreisläufen zu erhalten und somit auch die durch Abfallaufkommen erzeugten Gefahren für Umwelt und Gesellschaft zu reduzieren.

Bisherige Maßnahmen zur Erreichung einer nachhaltigen Produktion haben zwar dazu beigetragen, den ökologischen Fußabdruck der Produktion zu verringern. Jedoch reichen

Maßnahmen mit einer Einsparung im einstelligen Prozentbereich nicht aus, um eine wirklich nachhaltige Produktion ohne schädlichen Einfluss auf die Umwelt zu erreichen. Dafür bedarf es deutlich signifikantere Einsparungen oder sogar vollständig neue Ansätze. Die meisten Unternehmen betrachten Produktionsprozesse unabhängig voneinander, statt den gesamten Lebenszyklus eines Produktes zu berücksichtigen. Dies führt dazu, dass die Umweltauswirkungen eines Produkts in einzelnen Phasen nicht vollständig erfasst werden und die tatsächlichen Auswirkungen unterschätzt werden.

Ein umfassend nachhaltiger Ansatz erfordert eine gesamtheitliche Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts, von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Transport, Nutzung und Wiederverwendung. Unternehmen müssen sich darauf konzentrieren, ihre Umweltauswirkungen in allen Phasen des Lebenszyklus zu minimieren und gleichzeitig die sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen ihrer Produktion zu berücksichtigen [8]. Wenn ein Unternehmen versucht, zu hohe Skaleneffekte zu erzielen und infolgedessen zu viel produziert, kann dies erhebliche Umweltauswirkungen haben. Die Auswirkungen beeinträchtigen das Klima, die Luft- und Wasserqualität sowie die Biodiversität. Es ist wichtig, dass Unternehmen ihre Produktionsprozesse nachhaltig gestalten und sicherstellen, dass sie nur so viel produzieren, wie tatsächlich benötigt wird, um die Umweltbelastung zu minimieren. Ein Ansatz, um weniger Neuprodukte zu produzieren, ist die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten. Damit die Konsumenten dabei nicht auf technische Innovationen verzichten müssen, bedarf es bei diesem Vorgehen einer Möglichkeit für Upgrades. So werden mittels Upgrades neue Funktionen in ein Produkt eingebracht. Diese neuen Funktionen führen zudem zu einer Wertsteigerung des aktualisierten Produktes und bieten Unternehmen die Möglichkeit für Umsatzgenerierungen unabhängig von einer Neuproduktion. Eines solches Vorgehen wird auch als wertsteigernde Kreislaufwirtschaft bezeichnet und im nachfolgenden Beitrag genauer erläutert und motiviert.

Aktuell eingesetzte Ansätze versprechen die Reduktion von Treibhausgasen, einen geringeren Energieverbrauch, verbesserte Recyclinganlagen und ressourcensparende Produkte. Diese Ansätze adressieren einzelne Probleme, umfassen jedoch kein ganzheitliches Konzept. Es fehlt ein Konzept, das die Produktionswirtschaft auf eine Art ausrichtet, die das Aufhalten des Klimawandels fördert, die Ökosysteme erhält oder wiederherstellt und die Gesundheit aller Lebewesen auf unserer Erde unterstützt. Eine wertsteigernde Kreislaufwirtschaft verspricht aktuelle Probleme im Produktionskontext zu lösen, und Wirtschaftswachstum mit Ressourcenknappheit in Einklang zu bringen. Als ganzheitliches System betrachtet die wertsteigernde Kreislaufwirtschaft den gesamten Lebenszyklus der Ressourcen und erhält diese im System. Auch politisch manifestiert sich die Idee einer wirtschaftlichen Entwicklung zu einer ganzheitlichen Kreislaufwirtschaft. Im europäischen Green Deal von 2020 ist ein Aktionsplan inklusive konkreter Maßnahmen zur Entwicklung der Wirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft fest verankert [9]. Der politische Druck auf Unternehmen, ihre Produktionsprozesse umzustellen, nimmt ebenso wie das gesellschaftliche Bewusstsein für nachhaltige Produkte zu [10]. Dies bietet eine bedeutende Chance für die Entwicklung neuer Technologien und das aktive Vorantreiben neuer Geschäftsmodelle.

Begutachtet man das Konzept einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft, existieren intuitiv überwiegend positive Aspekte. Daher entsteht die Frage, warum viele produzierende Unternehmen noch weit weg von einer Umgestaltung sind und an bestehenden linearen Wirtschaftssystemen festhalten. Eine genauere Betrachtung der Bestandteile einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft ermöglicht Einblicke in die aktuellen Hindernisse für Unternehmen. Zum Etablieren einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft ist die Entwicklung

von neuen Produkten, die Produktion dieser Produkte und eine Akzeptanz für diese notwendig. Etablierte Produktentwicklungen führen zu Komplettlösungen mit neuen Funktionen, die das Entsorgen veralteter Produkte fördern und womit diese aus dem Umlauf genommen werden. Statt die Entwicklung hin zu einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft zu fördern, führt dies nur zu noch höheren Abfallmengen und zu weiteren Abhängigkeiten von begrenzten Ressourcen. Bestehende technische Konsumgüter sind hochintegrierte Produkte, die aufgrund der steigenden Komplexität schwer zu reparieren sind und einen hohen Recyclingaufwand verlangen. Eine Veränderung hin zu modularen Produkten, die sich durch ein einfaches Austauschen der Komponenten auszeichnen, bieten eine gute Reparierbarkeit und Ausbaufähigkeit. Diese komplette Neuausrichtung der Produkte erfordert jedoch ein Umstrukturieren der Produktionsprozesse. Derzeit hindern Übergangskosten, wie Investitionen in technologische Vorhaben, die Ausbildung von Mitarbeitern für neue Tätigkeiten, sowie die Umstellen der Produktion, Unternehmen daran ihre Produktion auf nachhaltige Produktmöglichkeiten umzustrukturieren [11]–[13]. Selbst wenn potenziell die finanziellen Mittel zur Verfügung ständen, eine neue Produktion zu etablieren, mangelt es Unternehmen häufig an fundiertem Fachwissen und technologischem Know-how zur Umsetzung [14], [15].

Produktionsabläufe wurden in vielen Unternehmen lange optimiert. Die Industrialisierung von Wiederaufbereitungs- und Upgrade-Prozessen erfordert eine umfassende Überarbeitung der Produktionsplanung, Prozessoptimierung, Organisation und IT-Systeme, um eine effiziente und skalierbare Produktion von wiederaufgearbeiteten Produkten zu ermöglichen. Um dies zu erreichen, ist es notwendig, Funktionserweiterungen, also Upgrades, im Re-Produktionsprozess zu berücksichtigen. Re-Assembly-Upgrade-Prozesse sparen bis zu 90 % der Material- und Umweltbelastung von Neuprodukten ein und erhöhen die Wertschöpfung pro Mitarbeiter, z. B. in der Fahrzeugproduktion, um etwa 30-60 %. Es ist wichtig, eine genaue Vorhersage der Nachfrage nach wiederaufgearbeiteten Produkten zu erstellen und sicherzustellen, dass genügend gebrauchte Produkte zur Verfügung stehen, um den Produktionsbedarf zu decken. Die Organisation muss angepasst werden, um eine reibungslose und effiziente Produktion von wiederaufgearbeiteten Produkten zu ermöglichen. Dies umfasst die Schulung von Mitarbeitern auf die spezifischen Anforderungen des Upgrade-Prozesses. Auch die Qualitätssicherung ist von entscheidender Bedeutung für die industrialisierte Wiederaufbereitung. Es ist wichtig, sicherzustellen, dass die wiederaufgearbeiteten Produkte den gleichen Standards entsprechen wie neu produzierte Produkte. Ist sowohl die Entwicklung neuer Produkte und ein Umstrukturieren der Produktionsprozesse möglich, stellen die Anforderungen von Kunden ein weiteres Hindernis zum Etablieren einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft dar. Die Kundenanforderungen an Produkte, möglichst günstig zu sein, neue Designanforderungen zu erfüllen und aktuelle Trends widerzuspiegeln stimmen nicht immer mit dem Gebrauch von wiederaufbereiteten Produkten, Recyclingmaterialien und langlebigen Produkten überein.

Werden die genannten Herausforderungen einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft gemeistert, bietet das System vielfältige Potentiale für die partizipierenden Unternehmen. So werden mit weniger Fabriken eine Umsatzsteigerung im zweistelligen Prozentbereich erzielt, bei einer gleichzeitigen Reduktion der Treibhausgasemissionen. Darüber hinaus werden insbesondere die Marge von produzierenden Unternehmen verdoppelt. Ursächlich dafür ist die bereits erwähnte Funktionserweiterung und Wertsteigerung, die bei geringeren Produktions- und Ressourcenaufwänden eine konstante Zahlungsbereitschaft der Kunden ermöglicht.

2 Wertsteigernde Kreislaufwirtschaft

Die Bemühungen für eine nachhaltige Produktion und umweltfreundliche Prozesse existieren genauso lange wie das damit verbundene Problemverständnis. Deshalb sind bereits diverse Ansätze mit den Begriffen der nachhaltigen Produktion assoziiert. Da diese Ansätze jedoch nicht die gewünschten Effekte einer umweltneutralen oder sogar positiven Bilanz erreicht haben, muss das Verständnis einer nachhaltigen Produktion erweitert werden. Nachhaltige Produktion kann durch neue Ansätze, wie die wertsteigernde Kreislaufwirtschaft, erreicht werden, welche bestehende Maßnahmen nicht ausschließen, sondern ergänzen (siehe Abbildung 1). Durch das Umdenken und Einführen einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft entsteht die Möglichkeit, eine nachhaltige Produktion nicht nur aus Gründen der bisher mangelnden Nachhaltigkeit zu etablieren, sondern auch aufgrund von ihrer Profitabilität. Denn langfristig betrachtet bietet eine konsequent umgesetzte nachhaltige Produktion nicht nur das größte Potential für die Umwelt, sondern auch für die Wirtschaftlichkeit und Innovation, insbesondere wenn die Prinzipien der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft berücksichtigt werden.

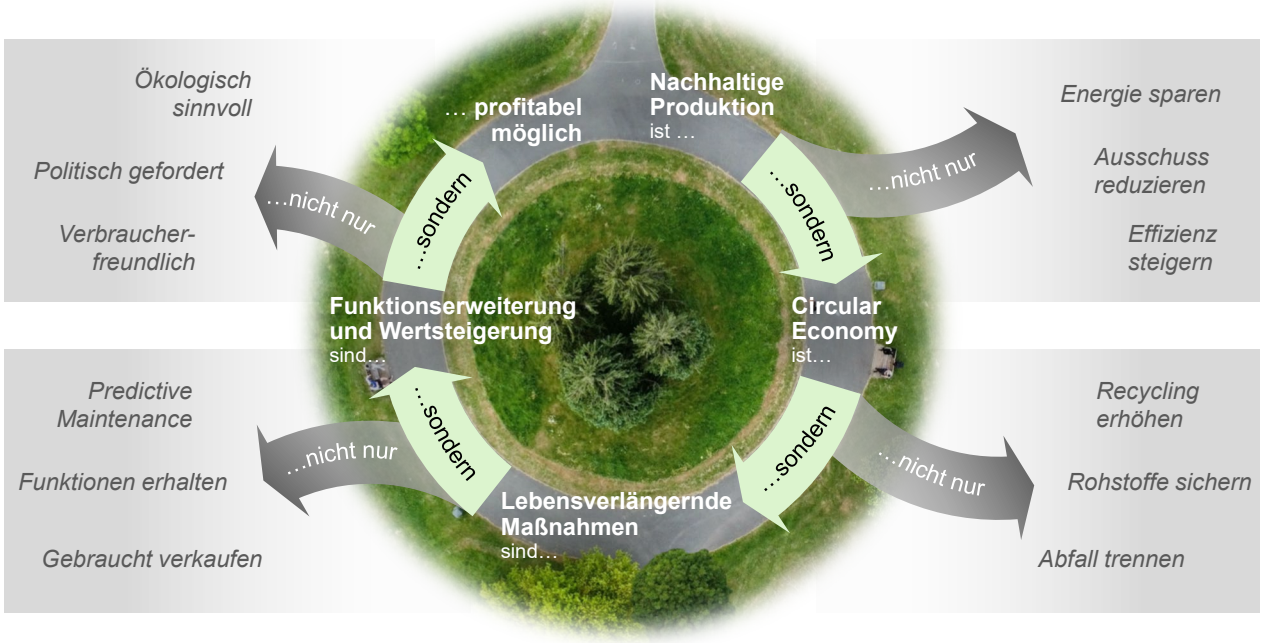


Abbildung 1: Beitrag der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft zur nachhaltigen Produktion

Die bestehenden Ansätze innerhalb des linearen Produktionsverständnisses hinsichtlich nachhaltiger Produktion sind geprägt von Energiesparmaßnahmen, Ausschussreduktion und Effizienzsteigerung. Diese Ansätze wirken zunächst ökologisch motiviert, haben jedoch ebenfalls einen finanziellen Antrieb. Insbesondere steigende Kosten für Energie stellen eine Motivation für Sparmaßnahmen dar. Eine Steigerung der Effizienz und eine Reduktion von Ausschuss innerhalb der Produktion sorgen sowohl für weniger Auswirkungen auf die Umwelt als auch für Kostenersparnisse des Unternehmens [16]. Eine bloße Effizienzsteigerung und Energieverbrauchsoptimierung reichen jedoch nicht aus, um eine Produktion in neutrale oder umweltpositive Prozesse zu transformieren. Eine in ihrer Effizienz optimierte Produktion benötigt weiterhin neue Ressourcen, um Produkte herzustellen. Um den Ressourcenverbrauch zu eliminieren wird ein System benötigt, dass nicht nur die Effizienz steigert, sondern durch die Wiederaufnahme bereits existie-

render Produkte eine Circular Economy aufbaut. Dies erfordert ein Umdenken von Unternehmen und unterscheidet sich vom herkömmlichen Produktionsverständnis, bei dem neue Ressourcen verwendet werden, um Produkte herzustellen und Produkte nach der Nutzungsdauer entsorgt werden. Mit konsequenten Kreisläufen wird es möglich sein, umweltneutrale Prozesse umzusetzen und langfristig umweltpositive Auswirkungen zu erzielen.

Langfristig nachhaltig ist die komplette Produktionswirtschaft zu überdenken und ein zirkuläres Produktionssystem zu etablieren. Das aktuelle Verständnis einer Kreislaufwirtschaft besteht vorwiegend aus Konzepten wie Recycling, Abfalltrennung, und Rohstoffsicherung. Produkte werden nicht ordnungsgemäß entsorgt oder bleiben, im Hinblick auf ungenutzte Handys, in Schubladen liegen. Endkunden stellen somit eine erhebliche Hürde in der Umsetzung von Recyclingvorgängen dar. Um die einzelnen Bestandteile eines Produkts zu recyceln, wird außerdem ein deutlich höherer Energieaufwand benötigt, als um ein Produkt weiter zu nutzen. Während Unternehmen intuitiv Produkte entwickeln, die in absehbarer Zeit ersetzt werden müssen, ist es langfristig sowohl für das Unternehmen als auch die Umwelt nachhaltiger Produkte mit einer längeren Lebensdauer zu produzieren. Durch die Verlängerung der Lebensdauer eines Produkts wird weniger Ressourcenverbrauch und Abfall generiert, was zu einer Verringerung der Umweltauswirkungen beiträgt. Gleichzeitig erzielen Unternehmen durch die Umsetzung von Lebensverlängerungsmaßnahmen auch wirtschaftliche Vorteile. Die Entwicklung von Produkten mit einer langen Lebensdauer senkt nicht nur den Recyclingbedarf, sondern auch den Bedarf an neuen Produkten. Durch die mögliche Reduktion der Produktion neuer Produkte werden Energieverbrauch und Konsum von begrenzten Rohstoffen minimiert. Kunden schätzen es, wenn ein Unternehmen lebensverlängernde Maßnahmen anbietet. Eine längere Lebensdauer des Produkts führt zu einer höheren Kundenzufriedenheit und Kundenbindung. Außerdem stärken Unternehmen, die sich für lebensverlängernde Maßnahmen einsetzen, ihr Image als nachhaltiges Unternehmen. Dies trägt langfristig dazu bei das Vertrauen der Kunden zu gewinnen und eine positive Wahrnehmung bei anderen Stakeholdern zu schaffen [17].

Ein langlebiges Produkt, dass nach seiner Nutzung weiterverkauft wird und nicht entsorgt werden muss, reduziert den Konsum von begrenzten und umweltschädlichen Rohstoffen. Die Anzahl der Anbieter, die Altgeräte wieder aufkaufen, aufbereiten und für ein günstigeren Preis verkaufen, ist, aufgrund der veränderten Nachfrage, gestiegen [18]. Andere Unternehmen spezialisieren sich auf die Wiederaufbereitung von Altgeräten. Dafür werden verschiedene Altgeräte von Endnutzern eingekauft, aufarbeitet und weiterverkauft. Ein Beispiel ist der Markt für Mobilgeräte. Der Wechsel eines Smartphone-Akkus genügt häufig bereits, um die ursprüngliche Funktion zu erhalten oder sogar die Akkulaufzeit zu verlängern, dadurch ist es möglich, dass das Gerät weiterverkauft und wieder genutzt wird. Eine Herausforderung für Unternehmen ist, dass die Rückgabe von Produkten nicht präzise prognostizierbar ist. Außerdem ist die Entwicklungsrate neuer Geräte so hoch, dass die Wiederaufbereitung der Geräte zügiger erfolgen muss um wiederaufbereitete Geräte schnell an den Markt zu bringen und attraktive Angebote anzubieten [19]. Zudem ist diese Art der Wiederaufbereitung nicht vollständig wettbewerbsfähig, da eine Funktionserweiterung fehlt und manche Kundengruppen deshalb Neuprodukte bevorzugen. Auch in der Fertigung werden lebensverlängernde Maßnahmen genutzt, um Maschinen und Anlagen mit möglichst wenig Ausfällen zu betreiben. Dafür werden Nutzungsdaten analysiert, sodass das Verhalten der Maschinen vorausgesagt wird [20]. Zwar werden so Ausfälle in der Produktion besser prognostiziert und die Lebensdauer der Maschinen verlängert, aber eine komplett nachhaltige Produktion wird dadurch nicht erreicht, da sich

diese Maßnahme nur auf die Lebensdauer der Maschinen konzentriert. Durch die Verlängerung der Lebensdauer der Maschinen wird der Ressourcenverbrauch reduziert und weniger Abfall produziert. Somit sind dies essenzielle Maßnahmen für die nachhaltige Entwicklung der Industrie. Werden die Produkte langlebiger fehlt jedoch der Marktbedarf und damit auch die Anforderung an neue Technologien. Die kontinuierlich steigende, wissenschaftlich und technische Entwicklung könnte so sich verlangsamen oder stagnieren. Dies ist eine Herausforderung für die Gesellschaft, denn neue Technologien bieten vielfältige Mehrwerte. Die technische Entwicklung trägt dazu bei, Abläufe effizienter zu gestalten und Lösungen für unsere aktuellen Klimaauswirkungen zu schaffen. Eine Gesellschaft verändert sich im Laufe der Zeit, jedoch bietet eine stagnierende wirtschaftliche Entwicklung Unternehmen keine Chance auf die neuen Bedürfnisse mit passenden Lösungen zu reagieren. Daher brauchen Unternehmen Möglichkeiten um die Lebensdauer von Produkten zu erhöhen, ohne dabei die technische Entwicklung zu behindern. Eine Möglichkeit und ein Erfordernis um alte Produkte weiter zu nutzen ist die Produktaufwertung durch eine Funktionserweiterung durch Updates und Upgrades, anstelle einer reinen Funktionserhaltung [21]. Obwohl intuitiv lebensverlängernde Maßnahmen weder mit technologischem Fortschritt noch mit der Aufwertung von Produkten verbunden werden, schafft die Funktionserweiterung eine Wettbewerbsfähigkeit von wiederaufbereiteten Produkten im Verhältnis zu Neuprodukten. Die Aufwertung von Produkten im Rahmen der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft wird deshalb als Upgrade Circular Economy bezeichnet. Möglich werden solche Aufwertungen durch eine neue Produktmodularität. Diese befähigt Unternehmen dazu die Leistungsfähigkeit ihrer Produkte zu verbessern und somit den Wert zu steigern [22]. Die Aktualisierbarkeit eines Produktes wirkt sich langfristig positiv auf die Umwelt aus, ohne dabei die Innovationskraft der Unternehmen zu hemmen [23]. Die neue Produktmodularität und somit die Möglichkeit den technologischen Wert kontinuierlich zu verbessen fördert die gesellschaftliche Entwicklung und die langfristige Aufrechterhaltung einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft [24]. Von den bereits etablierten Konzepten der Modularität unterscheidet sich die neue Produktmodularität in ihrer Ausrichtung. Im Gegensatz zur traditionellen Produktmodularität, bei der jedes Modul in der Regel für eine bestimmte Funktion oder Eigenschaft des Produkts verantwortlich ist, bezieht sich die neue Produktmodularität auf eine modulare Struktur, die eine höhere Flexibilität und Anpassungsfähigkeit ermöglicht. So können Verschleißteile leichter ausgetauscht, neue Funktionalitäten schneller integriert und Standardfunktionen erhalten werden. Die neue Produktmodularität ermöglicht Unternehmen, schnell auf sich ändernde Marktbedingungen oder Kundenbedürfnisse zu reagieren, indem sie modulare Designs verwenden um das Produkt leicht zu ändern. Dadurch sind Unternehmen in der Lage ihre Produkte schneller und kosteneffizienter auf den Markt bringen und gleichzeitig eine größere Anzahl von Kundenbedürfnissen erfüllen.

Die Möglichkeit Produkte anhand von Funktionserweiterungen und Wertsteigerungen lange im Markt zu halten, ist aufgrund der ressourcenschonenden Art ökologisch sinnvoll [25]. Lebensverlängernde Maßnahmen werden deshalb auch auf politischer Ebene gefordert. Anfang des Jahres 2022 wurde von der europäischen Kommission, als Teil des Ziels Europa bis 2050 zu dem ersten klimaneutralen Kontinent zu machen, ein Vorschlag vorgestellt, der die Vorschriften für den Verbraucherschutz überarbeitet. Dieser sieht vor, dass Unternehmen über die Lebensdauer ihrer Produkte informieren müssen und Angaben zu der Reparierbarkeit ihrer Produkte zur Verfügung stellen. Ferner sollen fehlende Angaben über Eigenschaften, welche die Lebensdauer gezielt beschränken, als unlautere Geschäftspraktik gelten [26]. Die Verbraucher profitieren von den resultierenden kos-

tengünstigen Möglichkeiten neue Technologien in ihre bestehenden Geräte zu integrieren. Aufgrund des Prinzips der neuen Produktmodularität, der Fokussierung auf technische Kernfunktionen des Produkts und der austauschbaren Funktionserweiterung entsteht ein geringerer Produktionsaufwand. Dadurch werden weniger Rohmaterialien verbraucht, Ressourcen gespart und die Produktionskosten gesenkt. Dies ermöglicht Unternehmen das verbesserte Produkt für Konsumenten, im Vergleich zu einem komplett neu produzierten Produkt, kostengünstiger zur Verfügung zu stellen. Ein breiteres Abdecken verschiedener Marktsegmente durch eine günstige Basisvariation oder Variationen mit neuester Technik und vollem Funktionsumfang erfüllt mehr Kundenanforderungen. Eine modulare Produktpolitik ist sowohl für Umwelt als auch Gesellschaft in Form von politischen Anforderungen und der Kundenzufriedenheit sinnvoll, wird jedoch mit einer reduzierten Wettbewerbsfähigkeit in Verbindung gebracht. Dabei ist die neue Produktmodularität für Unternehmen finanziell sinnvoll. Durch ein breiteres Abdecken verschiedener Marktsegmente wird eine größere Marktabdeckung erreicht und mehr Umsatz für das Unternehmen erzielt. Dem Unternehmen bietet die neue Produktmodularität zusätzlich eine hohe Kundebindung, da Kunden ihre Produkte langfristig upgraden wollen. Der Wechsel zu einem anderen Hersteller ist mit einer höheren finanziellen Hürde versehen, da das Grundgerüst des Produkts neu erworben werden müsste, anstatt lediglich die Funktionserweiterung zu erwerben. Die langfristige Kundenbindung bietet somit die Chance für planbare und konstante Einnahmen sowie höhere Gewinnmargen. Dies ist möglich, wenn der Neukauf von Kunden durch ein Upgrade substituiert wird. Ein Upgrade bietet dem Kunden einen ähnlichen Mehrwert wie ein Neuprodukt, weshalb eine ähnliche Zahlungsbereitschaft existiert. Gleichzeit bedeutet ein Upgrade jedoch für ein Unternehmen deutlich geringere Aufwände und somit eine größere Differenz zwischen Kosten und Marktpreis. Diese Ersparnis führt somit zu einer gesteigerten Profitabilität bei einer simultanen Entlastung von Umwelt und Ressourcen.

Insgesamt ist es im Hinblick auf eine nachhaltige Produktion notwendig intuitive Gedanken zu hinterfragen und innovative Ansätze wie die wertsteigernde Kreislaufwirtschaft und neue Produktmodularität zu betrachten. Eine Produktion, die zirkulär ausgerichtet ist, lebensverlängernde Maßnahmen auf allen Ebenen umsetzt und den Werterhalt durch die Wiederaufnahme der Produkte zur Reparatur oder Funktionserweiterung ermöglicht, ist in allen Dimensionen der Nachhaltigkeit sinnvoll. Der Wandel von einer traditionellen linearen Produktion hin zu einer nachhaltigen, geschlossenen, zirkulären Produktion erfordert strukturelle Veränderungen in einem Unternehmen. Die Art und Weise, wie Produktionsprozesse ablaufen, Produkte entwickelt werden und wie mit Stakeholdern umgegangen wird, verändert sich. Ein Framework zum Umsetzen einer solchen Upgrade Circular Production Economy soll Unternehmen dazu befähigen, eine wertsteigernde Kreislaufwirtschaft umzusetzen.

3 Framework for Circular Production Economy

Zum Erreichen einer Circluar Production Economy muss ein produzierendes Unternehmen Dichotomien auflösen, die alle Bereiche der Unternehmensstrategie betreffen. Das Diagramm in Abbildung 2 zeigt die daraus resultierenden Handlungsfelder im Framework für Circular Production Economy und bietet die Möglichkeit zur Positionierung eines Unternehmens. Dafür wird die Wettbewerbsstrategie des Unternehmens in den vier Quadranten auf den jeweiligen Achsen eingetragen. Für einen konsequenten Strategy-Fit der Wettbewerbsstrategie müssen produzierende Unternehmen ihre Strategiepositionen in allen vier Quadranten ähnlich ausprägen, also entweder alle Positionen im Zentrum oder

am Rand des Frameworks platzieren. Bei einer Abweichung entsteht ein Mis-Fit, der zwangsläufig Wettbewerbsnachteile erzeugt [27].

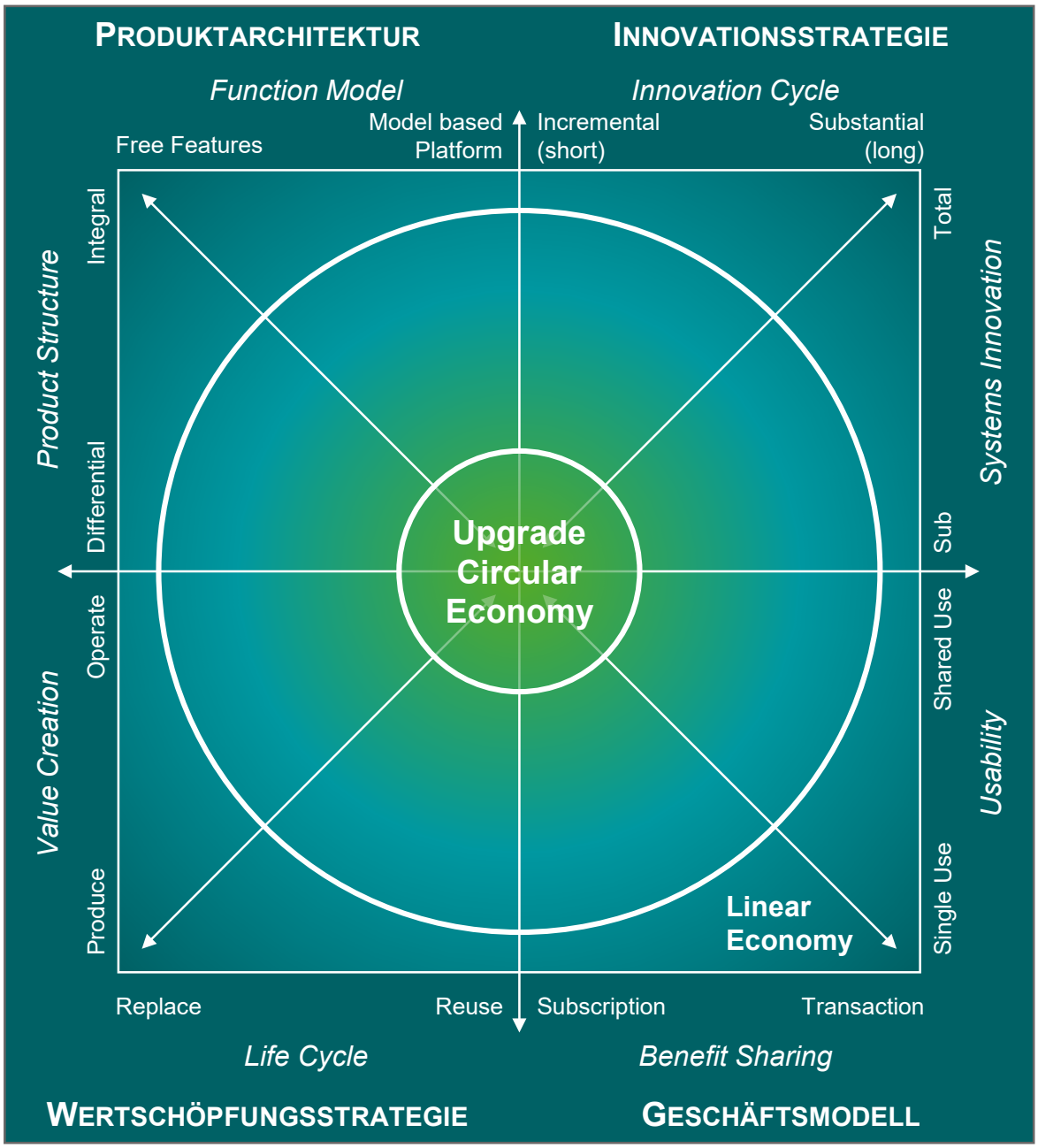


Abbildung 2: Framework for Circular Production Economy

Eine Positionierung in der Mitte des Diagramms zeigt, dass die Unternehmensstrategie mit den Prinzipien der Upgrade Circular Production im Einklang ist. Ein Unternehmen, welches so positioniert ist, ist in der Lage mit vergleichsweise geringen Aufwand eine wertsteigernde Kreislaufwirtschaft zu etablieren. Der äußere Ring des Frameworks repräsentiert die Charakteristiken der klassischen, linearen Wirtschaft. Unternehmen, die in allen Aspekten der Strategie den Rand besetzen, verfügen ebenfalls über eine konsistente und konsequente Strategie. Jedoch steht diese Strategie mit den in Kapitel 1 genannten Herausforderungen in Konflikt. Somit empfiehlt sich eine kritische Auseinandersetzung insbesondere mit Hinblick auf zukünftige Regularien und Kundenanforderungen. Für Unternehmen, die bei der Positionierung kein einheitliches Bild erzeugen, bietet das

Framework eine Hilfestellung. So wird erkannt, in welchen Bereichen das Unternehmen bereits gut aufgestellt ist und in welchen Handlungsbedarf besteht. Zudem verrät die exakte Positionierung auf den Achsen, wie dringlich der jeweilige Handlungsbedarf ist. Sobald sich ein Unternehmen entscheidet die eigene Aktivität stärker auf die Upgrade Circular Economy auszurichten, kann das Framework außerdem genutzt werden, um den aktuellen Status der Transformation zu überwachen.

Die *Produktarchitektur* ist der erste Quadrant des Frameworks für die Circular Production Economy. Eine Produktarchitektur beschreibt die Struktur eines Produkts, einschließlich der Anordnung und der Funktionen der Komponenten. Sie dient dazu, die Entwicklung, Fertigung und Wartung des Produkts zu erleichtern und sicherzustellen, dass es den Anforderungen der Kunden entspricht. Deshalb unterteilt sich die Produktarchitektur in die *Product Structure* und das *Function Model* des Produktes. Für die *Product Structure* wird zwischen einer *differential* und *integral* Bauweise unterschieden. Die *differential Structure* bezieht sich auf eine Konstruktion, bei der verschiedene Komponenten oder Systeme getrennt voneinander entwickelt und dann zusammengefügt werden. Die *integral Structure* hingegen bezieht sich auf eine Konstruktion, bei der verschiedene Komponenten so eng miteinander verbunden sind, dass sie eine Einheit bilden und gemeinsam entwickelt werden. Der Unterschied liegt darin, dass bei der *integral Structure* eine stärkere Integration und Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Komponenten oder Systemen angestrebt wird, während bei der *differential Structure* die Trennung und Spezialisierung von Komponenten im Vordergrund steht. Somit erleichtert eine differenziale Bauweise die neue Modularisierung, also die Trennung von Funktionen in einzelnen Modulen [28]. Das *Function Model* betrachtet die einzelnen Funktionen, die ein Produkt mit Hinblick auf die Kundenanforderungen realisieren soll. Für das Framework wird zwischen *Free Features* und *Modelbased Platforms* unterschieden. *Free Features* werden unabhängig von Standards gezielt an den Kundenbedarf angepasst. *Modelbased Platforms* schaffen hingegen einen Rahmen inklusive Vorgaben für den Einsatz von Funktionen in einem Produkt. Im Zusammenspiel mit einer *differential Structure* werden so z.B. Funktionen über Module hinzugefügt, um eine Funktionserweiterung zu erreichen.

Die *Innovationsstrategie* wird über die Achsen *Innovation Cycle* und *Systems Innovation* abgebildet. Der *Innovation Cycle* beschreibt die Innovationsgeschwindigkeit, welche durch die Marktanforderungen und Technologiereife bestimmt wird. Produkte mit einer hohen Technologiereife und konstanten Marktanforderungen werden in der Regel *Incremental* verbessert. Also in kurzen Abständen werden schrittweise und aufeinander aufbauend neue Innovationen auf den Markt gebracht. Diese Innovationen entsprechen einer kontinuierlichen Verbesserung am Produkt. Gegenteilig dazu ist die *Substantial* Innovation zu betrachten. Diese Art des Innovationszyklus sieht die Veröffentlichung von vollständig neuen Funktionalitäten und Produkteigenschaften vor, die auf einen disruptiven Effekt am Markt abzielen. Aufgrund der damit verbundenen Grundlagenforschung und den Entwicklungsaufwänden, erfolgen solche Innovationen eher in längeren Innovationszyklen. Die Systeminnovationen beziehen sich sowohl auf das *Sub-System* als auch das *Total-System*. Hierbei wird darauf abgezielt, bestehende, komplexe Produkte auf systematische Weise zu verändern und zu verbessern. Dabei werden unterschiedliche Aspekte eines Systems wie z.B. Technologie, Prozesse, Regulierungen, Verhaltensweisen und Umweltfaktoren berücksichtigt und gezielt verändert oder integriert. *Systems Innovation* ist somit eine multidisziplinäre und ganzheitliche Herangehensweise an die Innovation, die darauf abzielt, langfristige und tiefgreifende Veränderungen zu bewirken [29]. Insbesondere wenn das gesamte System betrachtet wird, ist auch eine *Substantial* Innovation hinsichtlich des Innovationszyklus möglich.

Der Quadrant des *Geschäftsmodells* besteht aus den Achsen *Usability* und *Benefit Sharing*. Die Usability beschreibt in diesem Kontext wie oft und von wie vielen Personen ein Produkt genutzt wird. Ein *Single Use* steht für die einmalige Nutzung eines Produktes von nur einer Person. Konträr dazu ist die Charakterisierung des *Shared Use*. In diesem Fall wir ein Produkt nicht nur mehrfach, sondern auch von einer Vielzahl an Personen verwendet. Diese Produkte sind z.B. Verkehrsmittel wie Fahrräder, Autos oder öffentliche Verkehrsmittel, aber auch komplexe Produkte wie Fertigungsmaschinen oder Produktionsanlagen. Die Idee hinter *Shared Use* ist, die Nutzung von Produkten effizienter zu gestalten und gleichzeitig die Umweltbelastung und Kosten zu reduzieren. Durch die gemeinsame Nutzung werden Produkte und Anlagen besser ausgelastet, was wiederum zu einer Reduzierung des Bedarfs an neuen Ressourcen führt. *Shared Use* fördert auch den sozialen Austausch und die Zusammenarbeit, indem es Menschen die Möglichkeit gibt, sich zu treffen und zusammenzuarbeiten, die sonst möglicherweise keinen Zugang zu solchen Produkten hätten. Für Unternehmen ist *Shared Use* wirtschaftlich sinnvoll, da die Auslastung der Produkte erhöht wird und durch neue Geschäftsmodelle wiederkehrende Einnahmen generiert werden. Das *Benefit Sharing* beschreibt die Art der Zahlungskonditionen zwischen Anbieter und Nutzer. Auf dieser Achse wird zwischen *Transaction* und *Subscription* Beziehungen unterschieden. *Transaction* Beziehungen basieren auf einzelnen Transaktionen, also Verkäufen von Produkten oder Dienstleistungen, bei denen der Kunde für jede einzelne Transaktion bezahlt. *Subscription* Beziehungen hingegen basieren auf einem regelmäßigen Einkommen aus wiederkehrenden Zahlungen von Kunden, die für den Zugang zu einem bestimmten Produkt oder einer bestimmten Dienstleistung bezahlen [30]. Der Hauptunterschied zwischen diesen Geschäftsmodellen ist, dass das *Transaction* Modell auf einmaligen Verkäufen von Produkten oder Dienstleistungen basiert, während das *Subscription M*odell auf einem wiederkehrenden Einkommen aus Abonnements basiert.

Der vierte Quadrant des Frameworks ist die *Wertschöpfungsstrategie*, welche sowohl die *Value Creation* als auch den *Life Cycle* betrachtet. Die *Value Creation* ist unterteilt in *Produce* und *Operate*. Dies sind zwei unterschiedliche Phasen im Wertschöpfungsprozess eines Unternehmens. Bei *Produce* wird ein Produkt aus Rohstoffen, Komponenten oder geistigem Eigentum hergestellt. Der Wert wird durch die Umwandlung von Inputs in Outputs geschaffen, die für den Kunden einen höheren Wert haben. *Operate* hingegen umfasst die Lieferung des Produkts oder einer Dienstleistung an den Kunden und seine Betreuung während des gesamten Lebenszyklus. Der Wert wird geschaffen, indem die Bedürfnisse und Erwartungen des Kunden erfüllt werden, Upgrades und Updates installiert, ein positives Kundenerlebnis geschaffen wird und die Kundentreue gestärkt wird. Der *Life Cycle* unterscheidet zwischen den konträren Ansätzen *Replace* und *Reuse*. *Replace* bedeutet, dass ein Produkt ersetzt und entsorgt wird. Der Ersatz erfolgt entweder durch ein neues Produkt, das die ähnlichen Funktionen erfüllt, oder durch ein Produkt, das eine verbesserte Leistung oder Funktionalität bietet. *Reuse* hingegen bedeutet, dass das Produkt wiederverwendet wird, anstatt es zu ersetzen. Dafür wird das Produkt über Updates und Upgrades mit neuen Funktionen ausgestattet, so dass der Wert gesteigert wird und ein Weiterverkauf möglich ist. Dieses Vorgehen steht stellvertretend für die Upgrade Circular Production Economy. Das Ziel der Upgrade Circular Production Economy besteht darin, die Lebensdauer von Produkten zu verlängern und die Notwendigkeit zu reduzieren neue Produkte zu produzieren.

Nachfolgend werden die einzelnen Handlungsfelder der Quadranten des Frameworks sowie die notwendigen Befähiger zum Erreichen der Dimensionen detailliert vorgestellt.

4 Handlungsfeld: Produktarchitektur

Das Handlungsfeld der Produktarchitektur zielt auf eine neue Produktmodularität ab. Dabei handelt es sich um ein Konzept, in welchem Produkte aus standardisierten Bauteilen und Komponenten zusammengesetzt werden. Diese Bauteile und Komponenten charakterisieren sich dadurch, dass sie einfach auszutauschen und zu reparieren sind [31]. Dies befähigt Unternehmen dazu ein Produkt nicht mehr als eine integrale Produktstruktur zu sehen, sondern als eine differentiale Struktur, die eine Summe ihrer Bauteile und Komponenten ist. Mit dem Ende der Lebensdauer muss somit nicht mehr das gesamte Produkt ersetzt werden, stattdessen werden beschädigte Bauteile repariert oder ersetzt. Hiermit soll im Sinne der Kreislaufwirtschaft der Abfall reduziert, die Ressourceneffizienz gesteigert sowie ein höherer Grad an Wiederverwendbarkeit und Reparierbarkeit erreicht werden [32].

In der heutigen Zeit sind viele Unternehmen von der wirtschaftlichen Herausforderung der Kundennachfrage nach einer steigenden Produktvielfalt betroffen. Dies zwingt die Unternehmen dazu, ihre Produktpalette kontinuierlich um neue Produktvarianten zu erweitern. Dies hat einerseits zur Folge, dass die interne technologische Vielfalt erweitert werden muss, aber auch, dass die Komplexität solcher Produkte zunimmt. Um dieser Herausforderung erfolgreich entgegen zu treten, bietet sich das Konzept der neuen Produktmodularisierung an. Dies zeigt sich in der Produktstruktur, die sich von einer integralen zu einer differenziellen Produktstruktur zurückwandeln muss. So ermöglicht die Modularisierung von Produkten ein einfaches Upgrade. Wenn ein defektes Modul ersetzt werden muss, muss nur dieses Modul ausgetauscht werden. Anstatt die Lebensdauer des gesamten Produkts zu beenden, wird durch dieses Upgrade ein neuer Lebenszyklus des Produkts gestartet. Zudem ermöglicht die Modularisierung von Produkten auch ein einfaches Update. Wenn ein neues Modul entwickelt wird, wird es einfach in das bestehende Produkt integriert, ohne dass das gesamte Produkt ersetzt werden muss. Dieser Wandel zu zunehmend differential aufgebauten Produkten, bei denen jedes Bauteil lediglich eine Funktion abbildet, ist in Abbildung 3 dargestellt.

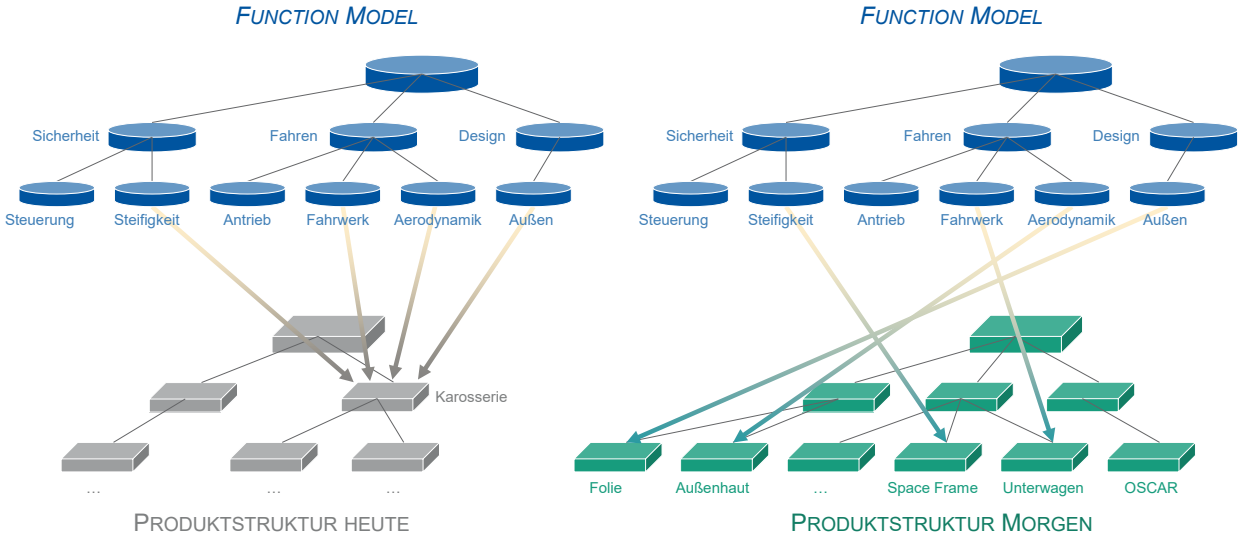


Abbildung 3: Veränderung des Verhältnis von Function Model und Produktstruktur

Ebenfalls im *Function Model* findet ein Wandel von den Free Features hin zu Produktfunktionen statt, die auf einer modellbasierten Plattform aufbauen. Hierbei lassen sich auf

Basis standardisierter Teile verschiedene Produktvarianten produzieren. Dadurch werden sowohl Nachhaltigkeitspotenziale und Kostenpotenziale erschlossen, als auch die Beherrschung der Komplexität verbessert [33]. Um die Vorteile der neuen Produktmodularität zu nutzen, müssen Unternehmen ihre Produktentwicklung und das Produktdesign anpassen.

Die konkrete Entwicklung und Optimierung eines modellbasierten Plattformdesigns basiert auf dem 6R-Konzept (recover, reuse, recycle, redesign, reduce und remanufacture) Das 6R-Konzept beinhaltet die sechs Stufen des Lebenszyklus von Materialien, die darauf abzielen das Produkt und dessen Design nachhaltig über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu gestalten. Die neue Produktarchtiektur muss so gestaltet sein, dass es Kernmodule gibt. Diese bilden als Living Standards die Basis für eine Modularität über mehre Lebenszyklen. Aufbauend auf den Living Standards werden Module für Funktionsupgrades, Leistungs- und Wertupgrades sowie Produktupdates entsprechend ihrer Lebensdauer angeordnet. Das Konzept zielt darauf ab, dass Module und Rohstoffe nach dem ersten Lebenszyklus zurückgewonnen werden und wiederverwendet werden. Hierbei ist es wichtig zu beachten, dass das Produktdesign funktional und ressourceneffizient ausgelegt werden muss. Zudem muss durch die differentiale Produktstruktur und die modellbasierte Produktplattform das Produktdesign eine einfache Montage und Wiederaufarbeitung gewährleisten. Der Schritt *reduce* fokussiert sich darauf den Ressourcen- und Energieeinsatz sowie den Abfall in einem Produktlebenszyklus zu minimieren. In dem Schritt *recover* werden die Produkte die das Ende ihres Lebenszyklus erreicht haben zurückerlangt. Anschließend werden in dem Schritt *reuse* Module oder Teile zurückgewonnen, damit diese in der gleichen Produktart wiederverwendet werden. Der Schritt *recycle* wirkt unterstützend auf *reuse* ein, indem Rohstoffe wiedergewonnen werden, die auch in anderen Produkten wiederverwendet werden. *Redesign* hat zum Ziel, das alte Produkt so zu überarbeiten, dass man ein neues Produkt erhält. Im Schritt *recover* wird ein defektes Produkt oder ein Produkt, das am Ende seines Lebenszyklus steht, wiederaufbereitet. Hierdurch wird das Produkt wieder in einen neuartigen Zustand gebracht und dessen Lebenszyklus wird verlängert. Dies stellt eine zu bevorzugen Alternative zu den Stufen *reuse* und *recycle* dar [35].

Das Unternehmen *MTA Gerüstbau* setzt in ihrer Unternehmensstrategie einen großen Wert auf Produktinnovationen. Hiermit zielt das Unternehmen darauf ab, die Produkte nachhaltig und klimaneutral zu gestalten. Vor diesem Hintergrund wurde das Prinzip der neuen Produktmodularität erfolgreich in das Produktportfolio übernommen und ist damit im Nachhaltigkeitskern des Quadranten Produktarchitektur anzuordnen. Ein konkretes Beispiel für solch ein Produkt stellt das Regalsystem Meta Multifloor da. Dabei handelt es sich um ein Fachbodenregal, welches nur aus den beiden Modulen Rahmen und Fachboden bestehet. Der modulare Produktaufbau des Regals ermöglicht eine beliebige Erweiterung des Regals. Zudem werden unter Verwendung von Zubehör zahllose Varianten wie auch Speziallösungen realisiert, wie beispielweise Schrägbodenregale, Felgenregale oder Regale mit Sichtlagerkästen [35]. Ein weiteres Beispiel für die erfolgreiche Umsetzung der Produktmodularität ist durch einen modularen Laptop von *Framework* gegeben. Dabei handelt es sich um einen Laptop, der explizit darauf ausgelegt worden ist, dass einzelne Teile des Laptops ausgetauscht und ersetzt werden. Der Nutzer kann somit seinen Laptop entweder leistungsfähiger gestalten oder defekte Teile problemlos

tauschen. Aufgrund dieser Charakteristik verfügt diese Laptopart über eine höhere Lebensdauer als das integrative Laptopdesign [36].

Die neue Produktmodularität ist einerseits vorteilhaft für Unternehmen und leistet andererseits einen großen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft. Die Nutzung eines modularen Aufbaus in verschiedenen Produktvarianten ist insofern für ein Unternehmen vorteilhaft, als das ein Unternehmen hierdurch flexibler, schneller und ressourceneffizienter produziert. Ein Anstieg in der Produktion von verschiedenen Produktvarianten führt in der Regel zu einem Trade-off zwischen der Produktvariantenanzahl und der Betriebsleistung. Die Produktmodularität minimiert mit ihren positiven Eigenschaften diesen Trade-off [37]. Dies wird dadurch realisiert, dass die gleichen Module in verschiedenen Produktvarianten verwendet werden, wodurch das Unternehmen Skaleneffekte erzielt. Dadurch wird eine effizientere Produktion ermöglicht. Des Weiteren handelt es sich bei solchen Modulen in der Regel um standardisierte Teile, die in großen Stückzahlen gefertigt werden, wodurch auch die Produktionskosten gesenkt werden. Zusätzlich beeinflusst die Standardisierung solcher Module die Flexibilität des Unternehmens positiv, da hierdurch die Möglichkeit zur Komponentensubstitution besteht [38].

Die differenzielle und „model-based“ Produktarchitektur ermöglicht einen geringeren Energie- und Ressourcenbedarf in der Produktion, wodurch es dem Aspekt der Nachhaltigkeit zuträglich ist. Bei defekten Produkten werden einzelne Module ausgetauscht, um die Funktionsfähigkeit wiederherzustellen und somit die Lebenszeit des Produkts zu erhöhen. Die Verlängerung der Produktlebenszeit führt auch zu einer Reduktion der Abfallmenge. Hierdurch werden zusätzliche Nutzenpotenziale realisiert, indem verhindert wird, dass auf energie- und ressourcenintensive Weise ein neues Produkt hergestellt werden muss. Die Integration von Prozessen zur Wiederaufarbeitung und Reparatur von Produkten fördert die Nachhaltigkeit der Produktmodularität zusätzlich. Das Recycling von Produkten die das Ende ihres Lebenszyklus erreicht haben führt dazu, dass man eine geschlossene Kreislaufwirtschaft erreicht. Hierdurch wird der Einsatz von Primärressourcen reduziert und es wird die Entstehung von Abfall vermieden. Zusätzlich werden bei der Verwendung von recycelten Materialien oder Modulen, im Vergleich zur Produktion von Neuprodukten, weniger Emissionen produziert, da der Energieaufwand hierbei geringer ausfällt. Zusätzlich werden durch die Fokussierung auf einzelne Module Lerneffekte erzielt, wodurch in der Produktion Energie und Ressourcen eingespart werden. Durch die effizientere Gestaltung der Produktion aufgrund des Lern- und Skaleneffekts wird auch der Ausstoß an Treibhausgasen reduziert [33].

Bei der Produktarchitektur in den Dimensionen „Product Structure“ und „Function Model“ handelt es sich um ein bedeutendes Konzept für die zukünftige nachhaltige Entwicklung. Die zahlreichen Vorteile eines neuen modularen Produktaufbaus in Kombination mit einer Kreislaufwirtschaft sind der Entwicklung hin zu einer nachhaltigeren Produktion zuträglich.

5 Handlungsfeld: Innovationsstrategie

Einen Ansatz für langlebige Produkte, die trotzdem den technologischen Fortschritt und Innovationen nicht behindern, liefert die Funktionserweiterung. In der zweiten Produktgeneration trägt die Funktionserweiterung dazu bei den Werterhalt des Produkts zu maximieren. Eine zweite Produktgeneration bezieht sich auf ein verbessertes oder erweitertes Produkt aus der ersten Generation und stellt damit einen inkrementellen Innovation Cycle dar. Im Normalfall erfährt ein Produkt eine Abnutzung im Laufe seines Lebens, dem ein Wertverlust einhergeht. Jedoch wird mittels Funktionserweiterung nicht nur die Abnutzung negiert, sondern hierdurch wird das Produkt auch mit aktuellen, innovativen Eigenschaften ausgestattet. Dies ermöglicht nicht nur, dass das Produkt über den gleich Wert wie zum Zeitpunkt des Kaufs verfügt, sondern den gleichen Wert wie ein neueres Produkt zum Zeitpunkt der Funktionserweiterung hat. Somit entspricht der Wert eines geupgradeten Produktes nicht dem eines Neuprodukts aus der gleichen Generation, sondern sogar dem eines Neuprodukts aus der neueren Generation. Hierdurch wird gewährleistet, dass das Produkt nicht nur auf die Funktionen zum Verkaufszeitpunkt limitiert ist, sondern in der Zukunft beliebig verbesserbar ist. Dies drückt sich in der Systems Innovation aus, die Innovationen von Subsystemen bis zum gesamten System gliedert. In diesem Zusammenhang ist der modulare Produktaufbau von hoher Bedeutung, da dies die Möglichkeit bietet, mit geringem Aufwand, in Subsystemen diese Änderungen in dem Produkt zu implementieren und dadurch Verbesserungen zu erzielen. Dadurch wird das Konzept, dass ein Produkt nur über eine fixe Funktionsausstattung verfügt, verabschiedet [39].

Die Unternehmen *Fairphone* und *Shift* nutzen bereits das Konzept des modularen Produktaufbaus, um dadurch eine Funktionserweiterung und einen Werterhalt in deren Produkt zu gewährleisten. Beide Unternehmen bieten Smartphones an, die nicht verklebt worden sind. Dadurch wird der modulare Produktaufbau sichergestellt und einzelne Module wie Akku, Kamera und Bildschirm können mit geringem Aufwand ausgetauscht werden. Der Austausch einzelner Module ermöglicht es dem Nutzer Funktionen des Smartphones inkrementell und in Subsystemen zu erweitern und dadurch dessen Wert mit Innovationen zu erhalten. Hierdurch sparen einerseits der Nutzer, da die Module günstiger sind als der Preis eines komplett neuen Smartphones. Auf der anderen Seite werden Ressourcen eingespart, was dem Aspekt der Nachhaltigkeit zuträglich ist [40].

Des Weiteren stellt der modulare Fahrzeugaufbau des Shuttle META von der *e.Volution GmbH* ein gutes Beispiel für diese Thematik dar (siehe Abbildung 4). Der modulare Aufbau des Fahrzeugs bietet die Vorteile, dass es hierdurch besonders langlebig und auch erneuerbar ist. Neben dem Fahrzeugkonzept sowie der kapitalarmen und energieeffizienten Produktion in den MicroFactories wird das Fahrzeug in einem innovativen Prozess in der Re-Assembly Upgrade Factory wiederaufbereitet. Nach jedem Re-Assembly-Einsatz entspricht die Fahrzeugqualität der eines Neuwagens zum aktuellen Zeitpunkt und verlängert so die Einsatzdauer des einzelnen Fahrzeugs. Genutzte Komponenten werden geprüft und bei Bedarf aufbereitet. Falls keine Neuteilqualität zu erzielen ist oder der Energie- und Ressourcenbedarf höher als für die Neuteilproduktion ist, werden Neuteile verarbeitet. Dies trägt dazu bei, dass der übliche Kreislauf einer Produktnutzung deutlich verlangsamt wird. Durch Umsetzung dieses Konzepts ermöglicht die *e.Volution GmbH* eine Lebensdauer von bis zu 50 Jahren und erzielt eine Ressourcenschonung innerhalb des Kreislaufsystems [41].

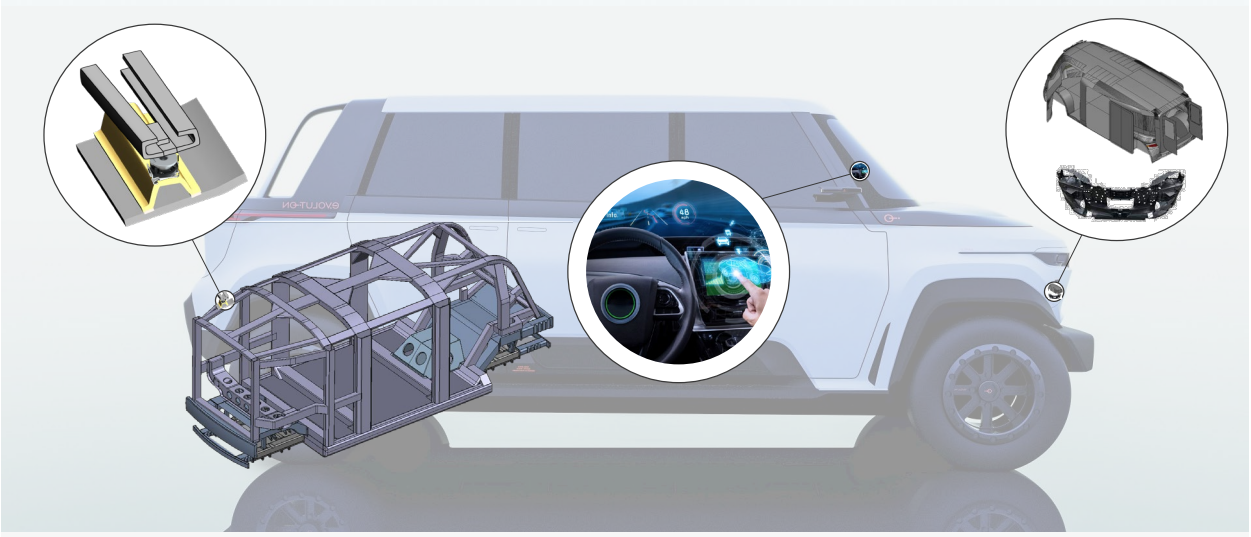


Abbildung 4: Modulare Fahrzeugaufbau des Shuttle META von der e.Volution GmbH (Quelle: e.Volution GmbH)

Das Prinzip der Funktionserweiterung und Werterhaltung durch inkrementelle Innovationen der Subsysteme birgt viele Vorteile hinsichtlich der Nachhaltigkeit. Dieses Prinzip ist mit einem modularen Produktaufbau gekoppelt, um den Prozess der inkrementellen Innovation zu ermöglichen beziehungsweise zu vereinfachen (siehe Abbildung 5). Dadurch das in diesem Prinzip die Möglichkeit geboten wird, einzelne Module in einem Produkt weiterzuentwickeln, wird der Ressourcenbedarf minimiert und die Lebensdauer im Ver-gleich zum herkömmlichen Produkt maximiert. Dabei nimmt bei einem herkömmlichen Produkt über die Produktlebensdauer der Kundennutzen bis zum End-of-life ab. Durch inkrementelle Innovation über die gesamte Lebensdauer des Produktes wird immer wie-der der Kundennutzen gesteigert. So verlängert sich die Produktlebensdauer und ohne dabei auf Innovationen zu verzichten. Für den Nutzer besteht kein Bedarf darin ein teures Neuprodukt zu kaufen um innovative Funktionen zu erhalten. Hierdurch werden auch Ressourcen und Energie eingespart, die ansonsten mit der Neuproduktion verbunden wären, da circa 80 % der Umweltauswirkungen eines Produkts auf die Designphase zu-rückzuführen sind [42].

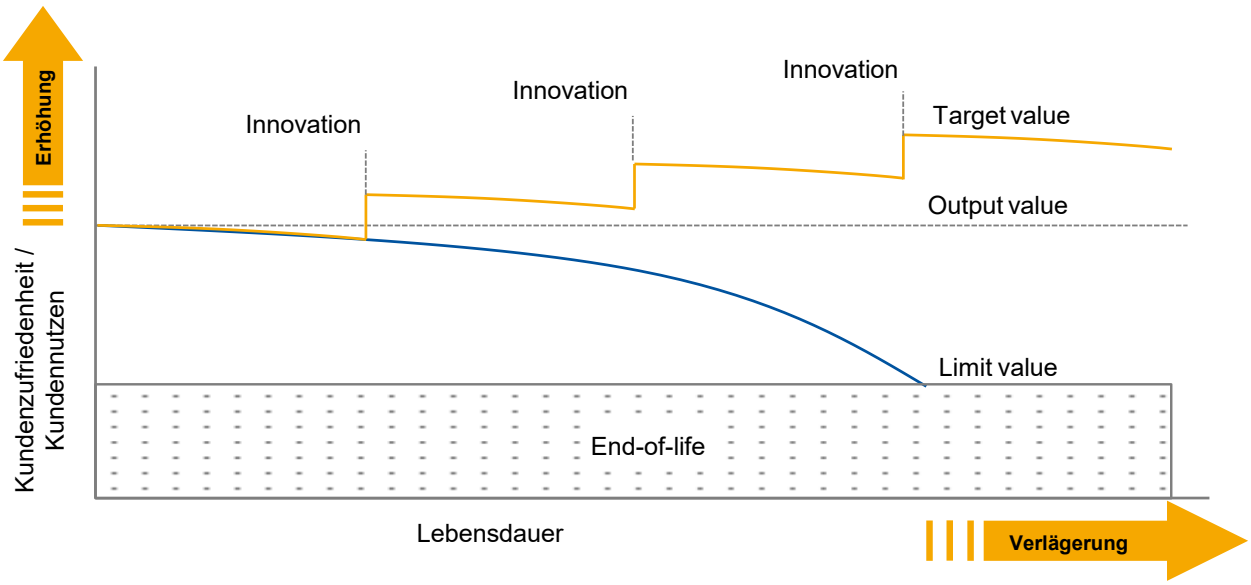


Abbildung 5: Inkrementelle Innovation und Wertsteigerung mittels Upgrades

Auch der damit einhergehende Ausstoß von Schadstoffen wird reduziert. Die Lebensdauererweiterung wird dadurch gewährleistet, dass funktionskritische Module ersetzt werden können. Der Austausch von Modulen ist zusätzlich vorteilhaft, indem hierdurch auch die Entstehung von Abfall reduziert wird. Dieser Vorteil wird noch weiter ausgebaut, wenn dieses Prinzip in einer Kreislaufwirtschaft integriert wird. Module oder Subsysteme, die gegen Innovationen ausgetauscht worden sind, werden genutzt um Rohstoffe und Materialien zu gewinnen. Diese werden anschließend in anderen Produkten weiterverwendet. Der Prozess der Wiederverwendung ist der Produktionseffizienz zuträglich.

6 Handlungsfeld: Geschäftsmodell

Geeignete Geschäftsmodelle sind unabdingbar für die Einführung einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft. Auf Basis von Geschäftsmodellen werden langfristige Strategien definiert und verfolgt sowie die Ressourcen des Unternehmens zielgerichtet eingesetzt werden. Jedes Geschäftsmodell muss individuell an die Gegebenheiten des Unternehmens angepasst werden und muss das nachhaltige Ziel des Unternehmens widerspiegeln. Zudem muss die darin enthaltende Strategie klar definiert sein, um ein zielgerichtetes Handeln sicherzustellen. Somit hat auch ein geeignetes Geschäftsmodell die langfristige Nachhaltigkeit zum Ziel. Dabei werden Aspekte der Klimafreundlichkeit kurzfristigen Gewinnen übergeordnet.

Eine wertsteigernden Kreislaufwirtschaft stützt sich auf die drei Grundsätze Funktions- und Wertsteigerung, zirkulärer Fluss von Materialien und Produkten sowie die Wiederherstellung der Natur [32]. Dies wird durch einen möglichst effizienten Ressourceneinsatz umgesetzt, damit diese in einem geschlossenen Kreislauf wiederverwendet werden. Anstatt das Materialien und Produkte nach einmaliger Verwendung weggeworfen oder nicht ausreichend ausgelastet werden, werden sie so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet und geupgradet. Durch diese Arten des Shared Use wird der Lebenszyklus eines Produkts verlängert und die Ressourcennutzung möglichst effizient gestaltet. Dadurch werden Abfälle minimiert und Ressourcen sowie Materialien verbleiben solange wie möglich in der Kreislaufwirtschaft [42]. Ein solch verminderter Einsatz von Primärrohstoffen reduziert den Ausstoß von Abgasen in Deutschland um bis zu 5,5 Mio. Tonnen, was sich wiederrum positiv auf die Umwelt auswirkt [43]. Zur erfolgreichen Umsetzung sind die richtigen Geschäftsmodelle zu wählen, die auf den Elementen *Subscription* und *Shared Use* aufbauen. Die Geschäftsmodelle werden im Framework for Circular Production Economy daher in die zwei Dimensionen *Benefit Sharing* und *Usability* gegliedert.

Besonders nachhaltige Geschäftsmodelle des *Benefit Sharings*, in denen Produkte besonders effizient in *Shared Use* genutzt werden, sind das Sharing Economy Modell und das Leasing Modell. Das Sharing Economy Modell stellt ein mögliches Geschäftsmodell zur Umsetzung einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft dar. Dieses Modell beschreibt eine sozioökonomische Plattform, die es den Nutzern ermöglicht Güter, Dienstleistungen und Informationen untereinander zu teilen (*Shared Use*). Anstatt das nun beispielweise ein Produkt kostenintensiv erworben werden muss (*Single Use*), wird dies zu einem günstigeren Preis unter den Nutzern der Plattform geteilt. Hierbei wird ein Produkt oder eine Dienstleistung zwischen mehreren Nutzern geteilt. Beim Carsharing handelt es sich um einen populären Vertreter dieses Modells. Das Sharing Economy Modell bietet ein großes Nachhaltigkeitspotenzial, da Unternehmen oder auch Privatpersonen, die Produkte nicht häufig benötigen, sich diese leihen können. Die gemeinsame Nutzung führt dazu, dass weniger Produkte produziert und somit auch weniger Ressourcen verwendet werden

müssen. Zudem bieten sich dem Nutzer die Vorteile, dass das Ausleihen günstiger ist und auch dessen Flexibilität in der Nutzung solcher Produkte erhöht [44].

Im Leasing-Modell wird das Recht auf Nutzung eines Produktes an ein Unternehmen oder eine Privatperson für einen bestimmten Zeitraum zu einem festen Preis übertragen [45]. Nach diesem Zeitraum kann das Produkt auf Wunsch durch ein neues ausgetauscht werden. Damit ist es auf der Achse *Benefit Sharing* deutlich im Bereich *Subscription* einzuordnen. Ein Beispiel für die Anwendung dieses Modells stellt das Unternehmen *MIL Maschinen- & Industrieanlagen-Leasing AG* dar. Sie stellen ihren Kunden solche Leasingleistungen für einen bestimmten Zeitraum zur Verfügung [46]. Dieses Modell ermöglicht den Nutzern einen gezielteren Einsatz von Ressourcen. Zusätzlich wird gewährleistet, dass nur die Ressourcen genutzt werden, die auch tatsächlich benötigt werden.

Im Product-Service-System Modell, als ein Subscription Benefit Sharing Modell, wird die Lebenszeit von Produkten durch gezielten Servicetätigkeiten des Herstellers optimiert. Im Kern steht ein Netzwerk aus Sachprodukten sowie Serviceprodukten von Akteuren und einer unterstützenden Infrastruktur zur Erfüllung von Kundenwünschen. Im Rahmen dieses Modells bietet ein Unternehmen seinen Kunden ein Produkt und die damit verbundenen Servicetätigkeiten an [47]. *Philips Lighting* verfolgt mit ihrer Beleuchtung unter anderem das Produkt-Service-System Modell. Das Unternehmen bietet die Beleuchtung nicht nur als Produkt an, sondern offeriert auch zugehörige Dienstleistungen wie beispielweise Instandhaltungen, Kontrollen und Systemoptimierungen [48]. Dieses Modell leistet einen Beitrag zur Nachhaltigkeit, indem die gezielten Servicetätigkeiten des Herstellers die Lebenszeit ihrer Produkte optimieren.

Wenn Remanufacturing mit Upgrades und Updates kombiniert wird, werden Funktionserweiterungen und Wertsteigerungen ermöglicht. Durch den Einsatz von Upgrades und Updates werden Remanufacturing-Prozesse dazu genutzt, um alte Produkte auf den neuesten Stand der Technik zu bringen. Zum Beispiel könnte ein Computer, der nicht mehr auf dem neuesten Stand ist, durch den Austausch von Komponenten wie dem Prozessor oder der Festplatte aufgerüstet werden, um eine bessere Leistung zu erzielen. Dadurch wird die Funktion des Produkts erweitert und seine Wertsteigerung erhöht. Ein weiterer Vorteil von Upgrades und Updates im Zusammenhang mit Remanufacturing ist, dass sie es Unternehmen ermöglichen, Produkte an neue Kundenmärkte anzupassen. Wenn beispielsweise ein bestimmtes Produkt nicht mehr gefragt ist oder der Markt gesättigt ist, wird es durch Upgrades und Updates an die Bedürfnisse eines neuen Marktes angepasst. Schließlich tragen Upgrades und Updates im Zusammenhang mit Remanufacturing auch dazu bei, die Lebensdauer von Produkten zu verlängern. Wenn ältere Produkte aufgerüstet werden, sind sie in vielen Fällen genauso effektiv wie neue Produkte. Auf diese Weise verlängern Unternehmen den Lebenszyklus ihrer Produkte und reduzieren die Menge an Abfall, die durch die Entsorgung von veralteten Produkten entsteht.

Jedes Geschäftsmodell bietet individuelle Vorteile, jedoch verfügt jedes Modell auch über individuelle Limitationen und lässt sich deshalb nicht in jeder Situation anwenden. Die Modelle Sharing-Economy und Leasing basieren beide auf dem Prinzip des Leihens von Produkten. Die Sharing-Economy ist vorteilhaft, wenn ein Unternehmen kurzfristig und flexibel Produkte leihen möchte, wohingegen das Leasing langfristiger ausgelegt ist (Subscription). Die Modelle nutzen das Prinzip der Wiederverwendung von Rohstoffen und Materialien (Shared Use). All dieses Modelle haben zum Vorteil, dass die Wiederverwendung von Rohstoffen den Bedarf an nicht-nachhaltigen Ressourcen reduziert und auch den entstandenen Abfall reduziert [32]. Wenn möglich bietet sich bei den Modellen das Upgrade als erstes an, da hierbei eine Funktions- und Wertsteigerung erreicht wird. An-

dernfalls wird auf die beiden anderen Modelle zurückgegriffen. Das Produkt-Service-System Modell bietet sich an, wenn sich ein Unternehmen ein Produkt anschaffen möchte bei einer optimalen Ausnutzung dessen Lebenszeit. Basierend auf den Vorteilen der Circular Production Economy und den zugehörigen Geschäftsmodellen wird deren Bedeutung für die Zukunft eindeutig hervorgehoben. Jedoch ist es notwendig, diese Geschäftsmodelle noch weiter zu entwickeln und anzupassen, um diese in möglichst vielen Bereich einzusetzen. Dies reicht aber nicht aus, die Unternehmen müssen vor dem Aspekt der Nachhaltigkeit ihre Perspektive zur Bewertung der Produktion anpassen. Es muss eine Erweiterung der Bewertungsdimensionen von einer reinen finanziellen Perspektive auf ökologische, soziale und steuernde Dimensionen vollzogen werden. Entscheidend ist, dass diese Perspektiven keine konträren Ziele beschreiben, sondern durch eine wertsteigernde Kreislaufwirtschaft ganzheitlich adressiert werden und letztendlich in einem betriebswirtschaftlichen Vorteil für Unternehmen resultieren.

7 Handlungsfeld: Wertschöpfungsstrategie

Zur Realisierung der neuen Produktmodularität braucht es nicht nur neue Entwicklungs- und Designstrategien, sondern auch industrialisierte Strukturen, um komplexe Massenprodukte wie Autos, Haushaltsgeräte, Maschinen und Anlagen systematisch für ein zweites, drittes oder viertes Leben aufzurüsten, ohne dass Kunden auf die gesteigerte Leistung und Attraktivität neu entwickelter Produkte verzichten müssen. Die Wiederaufbereitung und Reparatur von technologischen Endprodukten hat aufgrund der ständigen Neuentwicklung und Produktion dieser technologischen Endprodukte in den letzten 20 Jahren signifikant abgenommen. Kunden entscheiden sich meist aufgrund einer Neuanschaffung des gleichen oder eines ähnlichen Produkts gegen die Reparatur eines technologischen Endprodukts. [49] Zu hohe Reparaturkosten oder ein nicht zu reparierendes oder zu altes Endprodukt stehen als Gründe gegen eine Reparatur ungefähr gleichauf an erster und zweiter Stelle. Erste Ansätze von Unternehmen, ihre technologischen Endprodukte gezielt und damit industrialisiert wieder auf den Markt zu bringen, stellen bisher eher isolierte Ansätze im Sinne der Upgrade Circular Economy dar [51].

Die Industrialisierung von Wiederaufbereitungsprozessen ist bisher auf wenige Wirtschaftszweige beschränkt und begrenzt sich technologisch auf die Wiederaufbereitung von Primärstoffen und Materialien, die in ihrer Rohform zu Beginn des Produktlebenszyklus eingesetzt werden. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Primärmaterialien wie Kunststoffe und Metalle. Die Wiederaufbereitung von technologischen Endprodukten beschränkt sich bisher auf Insellösungen und Nischenprodukte. [51]

Für einen sinnvollen Paradigmenwechsel hin zu einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft bedarf es umfassendere Maßnahmen als diese isolierten Ansätze zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs. Eine Re-Assembly Fabrik ist eine Produktionsstätte, die sich auf den Zusammenbau gebrauchter oder recycelter Teile und Komponenten zu neuen Produkten spezialisiert hat. Der Prozess umfasst mehrere Stufen. Zunächst erfolgt die Sortierung und Demontage bei der die gebrauchten Produkte nach Typen sortiert und in ihre Einzelteile zerlegt werden. Anschließend erfolgt die Reinigung und Aufarbeitung. Hier werden die Teile gereinigt und aufgearbeitet, um sicherzustellen, dass sie in gutem Zustand und für die Wiederverwendung geeignet sind. Danach ist das eigentliche Re-Assembly möglich. Die Teile werden mit Spezialwerkzeugen und -geräten wieder zu neuen Produkten zusammengebaut. Abschließend erfolgt die Qualitätskontrolle. Die fertigen Produkte werden inspiziert und getestet, um sicherzustellen, dass sie die erforderlichen

Qualitätsstandards erfüllen. Ein mögliches Layout für eine Re-Assembly Fabrik ist in Abbildung 6 dargestellt.

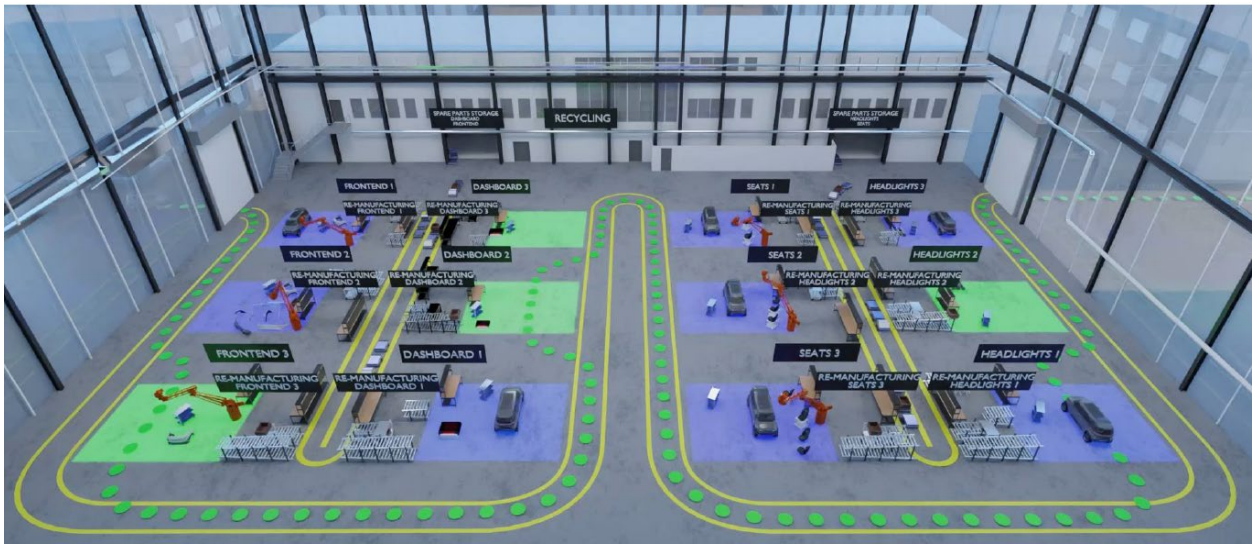


Abbildung 6: Materialfluss und Stationen in einer Re-Assembly Fabrik

Um dies zu erreichen, ist es notwendig, Funktionserweiterungen, also Upgrades, im Re-Produktionsprozess zu berücksichtigen. Re-Assembly-Upgrade-Prozesse sind in der Lage bis zu 90 % der Material- und Umweltbelastung von Neuprodukten einzusparen und die Wertschöpfung pro Mitarbeiter, z. B. in der Fahrzeugproduktion, um etwa 30-60 % erhöhen.

Auf den ersten Blick scheint die Produktaufbereitung nur für Produkte mit einem hohen Materialwert und hohen anfänglichen Produktions- und Entwicklungskosten wirtschaftlich zu sein, wie z. B. Flugzeugturbinen oder Kreuzfahrtschiffe. Um auch die Aufbereitung und Funktionsverbesserung von Produkten mit geringerem Wert zu ermöglichen, ist ein deutlich höherer Industrialisierungsgrad notwendig. Dies führt zu einer höheren Auslastung der Ressourcen und ermöglicht ähnliche Skalenerträge wie die Neuproduktion. Die Industrialisierung erfordert jedoch eine Trennung von Planung und Ausführung der notwendigen Aktivitäten. Dies wird durch die Ungewissheit über den Zustand und die Menge der zurückkehrenden Produkte erschwert. Detaillierte Informationen über die benötigte Arbeitszeit und die benötigten Ersatzteile bei der Aufbereitung liegen erst nach der Inspektion der Rückläufer vor, so dass eine Feinplanung der Produktion erst ab diesem Zeitpunkt erfolgt. Die daraus resultierenden Informationsasymmetrien führen zwangsläufig zu höheren Lagerbeständen, Prozesskosten und längeren Durchlaufzeiten.

Wenn Produkte mit kurzer Lebensdauer in einem linearen Wirtschaftssystem mit kurzfristigen Planungshorizonten hergestellt werden, führt dies zu Produktionsprozessen und Gebäuden, bei denen die kurzfristige Wirtschaftlichkeit in den meisten Fällen Vorrang vor der Nachhaltigkeit hat. Obwohl regulatorischer und gesellschaftlicher Druck die Hersteller zu nachhaltigeren Praktiken antreibt, besteht oft Unsicherheit darüber, wo die größten Potenziale in der Produktion liegen und welche Maßnahmen notwendig sind, um sie zu erschließen. Um dem entgegenzuwirken, bedarf es einer größeren Transparenz des Ressourcenverbrauchs, sowohl in Bezug auf die Menge als auch auf den Standort, sowie der langfristigen Fähigkeit, Gebäude immer wieder an neue Gegebenheiten anzupassen. Darüber hinaus tragen neue oder veränderte Messgrößen dazu bei, Investitionsentscheidungen in Richtung nachhaltigerer Lösungen zu lenken.

Potentielle Informationsasymmetrien der industriellen Wiederaufbereitung werden durch die Einrichtung von lebenszyklusübergreifenden Datenstrukturen wie der digitalen Produktakte aufgelöst. Dieser Datensatz verbindet akteurübergreifend Daten aus der Entwicklungsphase (Stückliste, Schnittstellen etc.), der Produktion (Bauteileigenschaften, Prozessparameter etc.) und den verschiedenen Nutzungsphasen (Betriebsdauer, Belastungsprofile etc.). Um dies zu erreichen, ist eine klare Identifizierung der relevanten Baugruppen und Module sowie ein einfacher Zugriff auf die Daten erforderlich.

Die industrielle Wiederaufbereitung wird oft noch nicht so automatisiert und industrialisiert wie die Erstproduktion des technologischen Endprodukts. Ein Beispiel ist das aufwändige Entfernen von "nicht lösbaren" materialschlüssigen Schrauben oder Nieten. Neue zeit- und ressourcensparende Verfahren, wie die adaptive Automation, müssen entwickelt und erprobt werden: Dies ist der Schlüssel zur Industrialisierung von Wiederaufbereitungsprozessen für technologische Endprodukte.

8 Befähiger: KI-basiertes Lifecycle Management

Das Produkt Lifecycle Management (PLM) ist ein wissensintensiver Prozess, der Markt Analysen, Produkt Design und Entwicklung, aber auch Produktion, Prozessentwicklung, Produktvertrieb, Nutzung, Service nach dem Verkauf sowie Wiederaufbereitung eines technologischen Endprodukts inkludiert [52]. Aufgrund der großen Menge an anfallenden Daten, eignet sich das PLM besonders für den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) bzw. für den Einsatz von untergeordneten Methoden der KI wie z.B. Big Data. Die Verarbeitung von großen Datenmengen, wie sie im PLM anfallen und das Verknüpfen dieser Daten mit Handlungsempfehlungen lassen sich mit KI erfassen und transparent machen. [53] Für jegliche Anwendungen von KI werden zunächst eine aufbereitete Datenmenge und definierte Input und Output Daten benötigt. Bisherige Anwendungen von KI im PLM gruppieren diese Input und Output Daten in die drei Perioden des PLM, Beginning of Life (BOL), Middle of Life (MOL) und End of Life (EOL). Die Input Daten reichen auch in diesem Betrachtungsfeld von Daten zu Kundenanforderungen (z.B. Produktfunktion oder Konfigurationen) bis hin zu Umweltdaten während der Nutzung des Produkts (z.B. Nutzungskonditionen oder Nutzungsdauer) [54]. Die Output Daten hingegen starten mit Daten zu Designspezifikationen wie Materiallisten oder Toleranzen und enden mit Daten zur Demontagemöglichkeit wie z.B. Demontage Kosten oder Recycling Daten. Der Fokus bei der Verarbeitung der Daten liegt auf der Verarbeitung mittels prozesshistorischen Methoden. [55] Für die auf der Prozesshistorie basierende Methoden wird eine große Menge an historischen Prozessdaten benötigt, die in geeigneter Weise annotiert sind. Auch das bisherige PLM bietet dafür eine ausreichende Grundlage, allerdings schließt es mehrere Lebenszyklen eines Produkts bzw. Leben eines technologischen Endprodukts zunächst aus. [56]

In der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft fallen durch die entstehenden neuen Lebenszyklen bzw. Leben eines Produkts weitere Daten zum eigentlichen Produkt, aber auch zur Baugruppe und deren einzelnen Komponenten an. Um die Entscheidung zwischen Funktionserweiterung, Wertsteigerung oder tatsächlichen Ende des Lebenszyklus eines technologischen Endprodukts zu treffen und die dafür ausschlaggebenden Informationen und Daten zu verarbeiten, braucht es auch in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft KI-basiertes Lifecycle Management (siehe Abbildung 7).

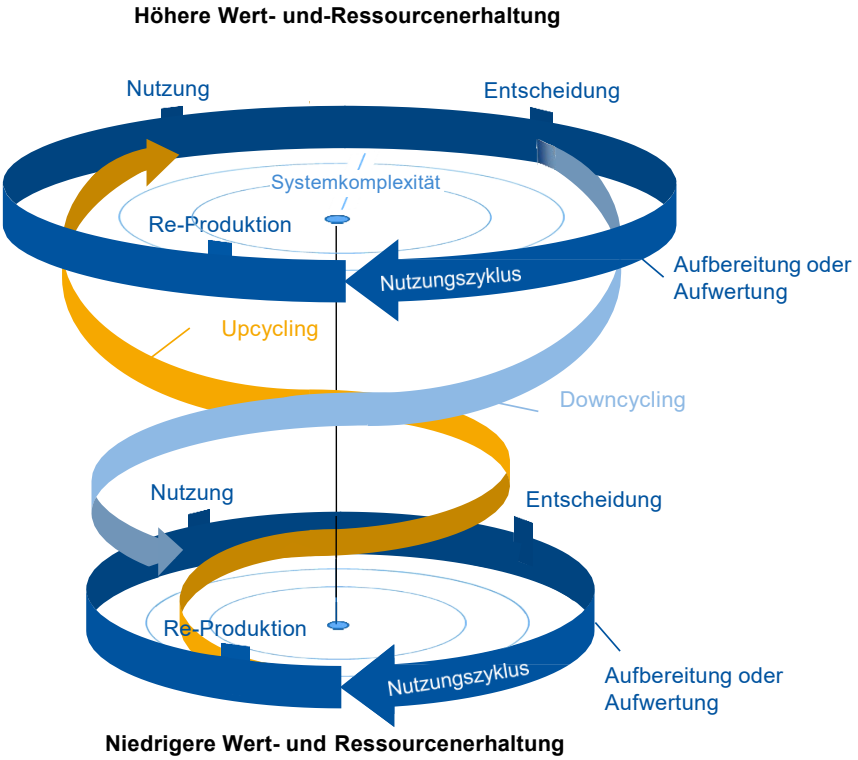


Abbildung 7: KI-basiertes Lifecycle Management in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft

Das KI-basierte Lifecycle Management entscheidet in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft basierend auf der Systemkomplexität, in Abhängigkeit zum aktuellen Produktwert und zur Produktlebenszeit des technologischen Endprodukts, in welchen Nutzungszyklus ein Produkt fließen soll. Die Systemkomplexität gibt dabei an, wie komplex das technologische Endprodukt ist, also ob es aus verschiedenen Baugruppen besteht, aus wie vielen und welchen Komponenten sich technologische Endprodukte zusammensetzen und welche Fügeverfahren oder Mechanismen für die Zusammensetzung angewendet wurden. Das KI-basierte Lifecycle Management entscheidet, ob ein Produkt weiterhin in seiner Funktionsebene seines aktuellen Lebenszyklus zirkuliert oder sich in eine neue Funktionsebene begibt und damit ein zweites, drittes oder viertes Leben erhält. Diese Entscheidungsfindung findet auf allen Funktionsebenen statt, so wird nicht nur das technologische Endprodukt selber, sondern auch einzelne Baugruppen innerhalb des Produkts, bis hin zu kleinen Komponenten betrachtet.

Die Infrastruktur produzierender Unternehmen zur gezielten Aggregation und Aufbereitung von Informationen über mehrere Datenquellen hinweg und die Schaffung echtzeitfähiger Entscheidungsgrundlagen für domänenübergreifende Fragestellungen, auch bekannt als „Internet of Production, bildet die Grundlage für eine effizientere und wertsteigernde Kreislaufwirtschaft sowie KI-basiertes LCM (Lifecycle-Management). Um den vollen Nutzen aus diesen Ansätzen zu ziehen, müssen diese weiterentwickelt und implementiert werden. Eine digitale Produktakte (siehe Abbildung 8), die den gesamten Produktlebenszyklus dokumentiert, hilft Unternehmen einen umfassenderen Überblick über ihre Produkte zu erhalten und bessere Entscheidungen zu treffen, indem sie Transparenz und Rückverfolgbarkeit von Produkten ermöglicht. Grundsätzlich gelten für die Entwicklung der digitalen Produktakte hohe Anforderungen an die präzise Dokumentation der Prozesse und damit verknüpften Daten, die kontinuierliche Echtzeitdokumentation aber auch die Garantie der Fälschungssicherheit der aufgenommenen Daten.

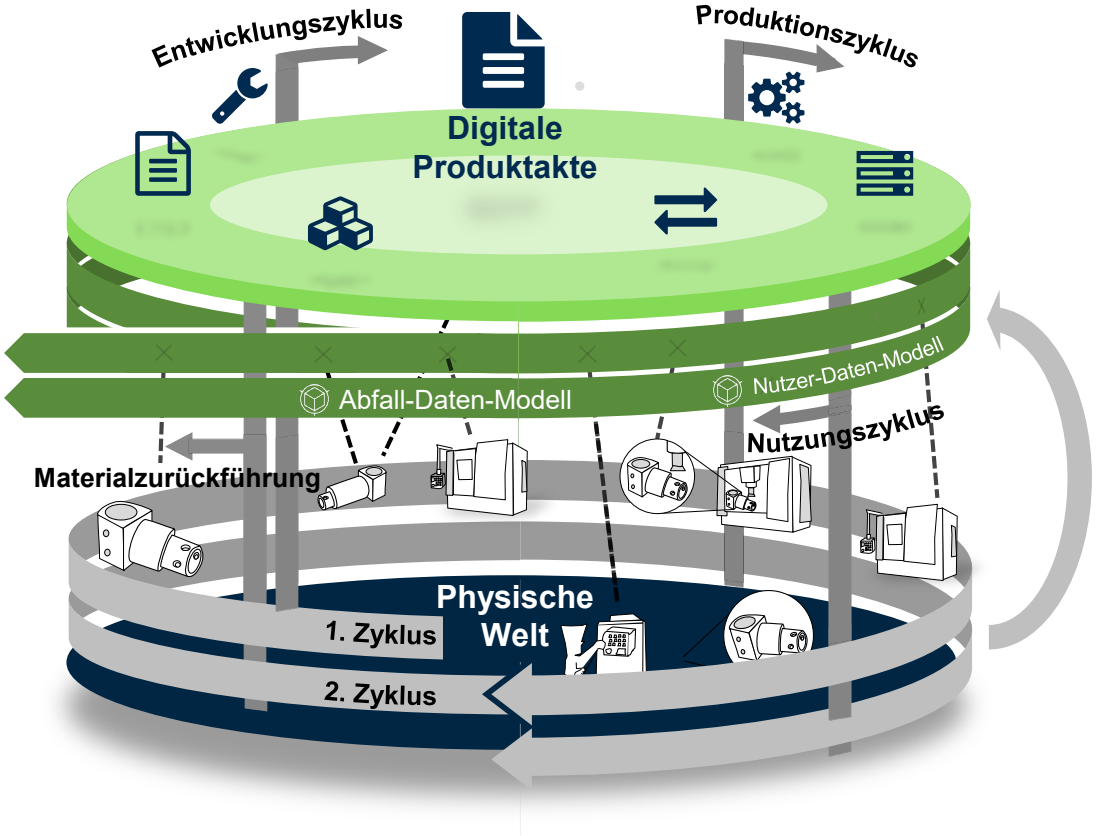


Abbildung 8: Digitale Produktakte in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft

Für die wertsteigernde Kreislaufwirtschaft wird der digitale Schatten um die digitale Produktakte erweitert. Der digitale Schatten stellt damit in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft ausschließlich die Verbindung zwischen der physischen Welt und der digitalen Produktakte dar. Die digitale Produktakte wird zunächst mit Informationen des Produktdatensatzes wie Materialdaten, Teilelisten oder auch Reparaturanleitungen in den Entwicklungszyklus gespeist. Übergehend in den Produktionszyklus werden anschließend Demontage bzw. Remontage Anleitungen, aber auch Nutzerdaten und Daten zur Produkthistorie gespeichert. Zusätzlich kommt in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft die Daten zu Vorgänger- und Nachfolgerkomponenten hinzu. Die Speicherung dieser Daten

ist die Befähigung zu mehreren Nutzungszyklen einzelner Produkte, aber auch ihrer Bauteile und einzelnen Komponenten.

Entscheidend für die KI-basierte Verarbeitung der Lebenszyklusdaten der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft ist diese digitale Produktakte, welche alle Lebenszyklusdaten speichert und nicht wie für das konventionelle PLM zwischen den unterschiedlichen Phasen des PLM, BOL, MOL und EOL unterscheidet. Diese Phasen gehen für das PLM der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft in einander über und sind auch für die einzelnen Baugruppen und Komponenten eines Endproduktes unterschiedlich. Abbildung 9 zeigt den benötigten Informationsfluss während des Lebenszyklus der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft und die daraus entstehende Cloud basierte Emergenz-Evaluation.

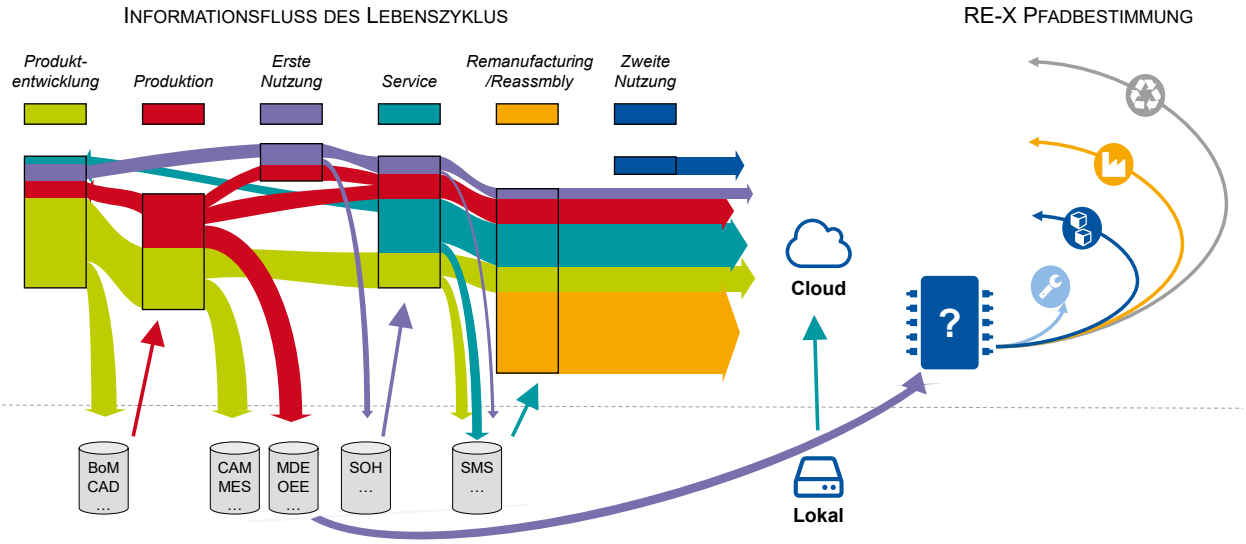


Abbildung 9: Informationsfluss des Lebenszyklus und Cloud basierte Emergenz-Evaluation

Die zentrale Open-Source Cloud sammelt alle Daten, die für eine Klassifizierung und Identifizierung des nachhaltigen Re-X Pfadbestimmung benötigt werden (d.h. Reassembly, Remanufacturing etc.) benötigt werden. Zu unterscheiden ist hier, dass der Datenfluss mit der ersten Nutzung nicht aufhört, sondern eine zweite, dritte oder vierte Nutzung des Endprodukts, seiner Baugruppen oder Komponenten an den Service anschließt. Dies muss sich auch in der Speicherung und Verarbeitung der Daten wiederspiegeln. Entschieden wird dann zwischen den möglichen Weiterverarbeitungsprozessen für das Endprodukt, seiner Baugruppe oder einzelnen Komponenten.

Durch den Einsatz von KI-basiertem Lifecycle Management überwachen und bewerten Unternehmen den Lebenszyklus ihrer Produkte, Komponenten, Materialien und Prozesse. Dadurch sind sie in der Lage wert- und funktionssteigernde Maßnahmen rechtzeitig und optimal zu identifizieren und umsetzen, um die Effizienz und Rentabilität zu steigern und gleichzeitig die Umweltauswirkungen zu minimieren. Die Anwendung von KI ermöglicht eine präzisere Analyse von Daten und eine schnellere Entscheidungsfindung auf Grundlage von automatisch generierten Erkenntnissen und Vorhersagen. Entscheidend ist dabei die Entwicklung einer digitalen Produktakte in einem Internet of Sustainable Production, als Weiterentwicklung des Internet of Production, welches die Datenbasis für das KI-basierte Lifecycle Management speichert, aktualisiert und zur Verfügung stellt.

9 Zusammenfassung

Unternehmen stehen unter einem enormen Druck, ihre Produktion vollständig nachhaltig auszurichten, da eine breite Öffentlichkeit aus Politik, Kunden und Gesellschaft nicht mehr nur eine weitere Effizienzsteigerung der Produktion verlangt, sondern auch Prozesse und Produkte fordert, die keine negativen Umweltauswirkungen haben. Dafür bedarf es neuer Ansätze, die das Verständnis von nachhaltiger Produktion um das der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft erweitern. So werden neue Aspekte betont, damit langlebige Produkte mittels Funktionserweiterung profitabel am Markt angeboten werden. Zudem müssen Unternehmen ihre Strategie auf dieses neue Verständnis ausrichten. Produktarchitektur, Geschäftsmodelle, Innovations- und Wertschöpfungsstrategie können auf die Charakteristika einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft aligniert werden. Dadurch wird es möglich, Produkte zu entwickeln, die mittels differentialer Modulbauweise in der Lage sind eine modellbasierte Plattform für verschiedene Funktionalitäten anzubieten. Zudem wird in kurzen, inkrementellen Innovationszyklen eine kontinuierliche Verbesserung der Teilsysteme eines Produktes erreicht. Unterstützt wird dieses Vorgehen durch eine subskriptionsbasierte Kundenbeziehung, bei der Produkte mit anderen Nutzer geteilt werden. Dabei wird die Wertschöpfung von der eigentlichen Produktion auf den Betrieb der Produkte erweitert. Durch einen solchen Betrieb wird zusätzlich die Wiederverwendung der Produkte über eine lange Lebensdauer ermöglicht und motiviert. Damit dies informationstechnisch abgebildet werden kann, wird außerdem ein global vernetztes Internet of Sustainable Production benötigt.

10 Literatur

[1] The Intergovernmental Panel on Climate Change. „Global Warming of 1.5 ºC: Special Report.” ipcc.ch. https://www.ipcc.ch/sr15/ (Zugriff am: 19. Feb. 2023).

[2] „Übereinkommen von Paris,” Vereinte Nationen, 2015. Zugriff am: 19. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf

[3] Climate Watch. „Historical GHG Emissions.” climatewatchdata.org. https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions (Zugriff am: 1. Jan. 2023).

[4] SHIFT. „Shift.” shiftphones.com. https://www.shiftphones.com/ (Zugriff am: 3. Feb. 2023).

[5] D. Hariyani, S. Mishra, P. Hariyani und M. K. Sharma, „Drivers and motives for sustainable manufacturing system,“ *Innovation and Green Development*, Jg. 2, Nr. 1, Art.-Nr. 100031, 2023, doi: 10.1016/j.igd.2022.100031.

[6] I. Gödl-Hanisch und M. Menkhoff, „Inwieweit geben Unternehmen die gestiegenen Einkaufspreise an ihre Kunden weiter?,“ *ifo Schnelldienst*, Jg. 75, Nr. 12, S. 32-34.

[7] D. S. Jacks, „From boom to bust: a typology of real commodity prices in the long run,“ *Cliometrica*, Jg. 13, Nr. 2, S. 201–220, 2019, doi: 10.1007/s11698-018-0173-5.

[8] M. Zarte, A. Pechmann und I. L. Nunes, „Decision support systems for sustainable manufacturing surrounding the product and production life cycle – A literature review,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 219, S. 336–349, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.092.

[9] European Commission. „Circular economy action plan.” environment.ec.europa.eu. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en (Zugriff am: 3. Feb. 2023).

[10] M. T. Lee und R. L. Raschke, „Stakeholder legitimacy in firm greening and financial performance: What about greenwashing temptations?, “ *Journal of Business Research*, Jg. 155, Part B, Art.-Nr. 113393, 2023, doi: 10.1016/j.jbusres.2022.113393.

[11] A. Nygaard, „From Linear to Circular Economy: a Transaction Cost Approach to the Ecological Transformation of the Firm,“ *Circular Economy and Sustainability,* Jg. 2, Nr. 3, S. 1127–1142, 2022, doi: 10.1007/s43615-022-00158-w.

[12] G. K. Badhotiya, S. Avikal, G. Soni und N. Sengar, „Analyzing barriers for the adoption of circular economy in the manufacturing sector,“ *International Journal of Productivity and Performance Management*, Jg. 71, Nr. 3, S. 912–931, 2022, doi: 10.1108/IJPPM-01-2021-0021.

[13] M. Hina, C. Chauhan, P. Kaur, S. Kraus und A. Dhir, „Drivers and barriers of circular economy business models: Where we are now, and where we are heading,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 333, Art.-Nr. 130049, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130049.

[14] H. Corvellec, A. F. Stowell und N. Johansson, „Critiques of the circular economy,“ *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 26, Nr. 2, S. 421-432, 2021, doi: 10.1111/jiec.13187.

[15] J. Tan, F. J. Tan und S. Ramakrishna, „Transitioning to a Circular Economy: A Systematic Review of Its Drivers and Barriers,“ *Sustainability*, Jg. 14, Nr. 3, Art.-Nr. 1757, 2022, doi: 10.3390/su14031757.

[16] G. Freisinger, O. Jöbstl, B. Kögler, J. Lipp und M. Strohrmann, *Die digitale Transformation des Qualitätsmanagements: Potenziale nutzen, Strategien entwickeln, Qualität optimieren*. München: Hanser, 2022.

[17] P. B. Jensen, L. N. Laursen und L. Møller Haase, „Barriers to product longevity: A review of business, product development and user perspectives," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 313, Art.-Nr. 127951, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127951.

[18] R. Harms und J. D. Linton, „Willingness to Pay for Eco-Certified Refurbished Products: The Effects of Environmental Attitudes and Knowledge," *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 20, Nr. 4, S. 893–904, 2016, doi: 10.1111/jiec.12301.

[19] B. Sarkar, M. Ullah und M. Sarkar, „Environmental and economic sustainability through innovative green products by remanufacturing," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 332, Art.-Nr. 129813, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129813.

[20] T. Zonta, C. A. da Costa, R. da Rosa Righi, M. J. de Lima, E. Silveira da Trindade und G. P. Li, „Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review," *Computers & Industrial Engineering*, Jg. 150, Art.-Nr. 106889, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106889.

[21] E. Chierici und G. Copani, „Remanufacturing with Upgrade PSS for New Sustainable Business Models," *Procedia CIRP*, Jg. 47, S. 531–536, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.03.055.

[22] J. Bonvoisin, F. Halstenberg, T. Buchert und R. Stark, „A systematic literature review on modular product design," *Journal of Engineering Design*, Jg. 27, Nr. 7, S. 488–514, 2016, doi: 10.1080/09544828.2016.1166482.

[23] M. A. Khan, S. Mittal, S. West und T. Wuest, „Review on upgradability – A product lifetime extension strategy in the context of product service systems," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 204, S. 1154–1168, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.329.

[24] H. Cheng, S. Dong, F. Li, Y. Yang, Y. Li und Z. Li, „A circular economy system for breaking the development dilemma of 'ecological Fragility–Economic poverty' vicious circle: A CEEPS-SD analysis," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 212, S. 381–392, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.014.

[25] G. Grunwald, J. Schwill, *Nachhaltigkeitsmarketing: Grundlagen – Gestaltungsoptionen – Umsetzung*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2022.

[26] Europäische Kommission. „Sustainable consumption: Policy-relevant insights on the consumers' engagement in the circular economy." commission.europa.eu. https://commission.europa.eu/live-work-travel-eu/consumer-rights-and-complaints/sustainable-consumption_de (Zugriff am: 5. Feb. 2023).

[27] C. Collins und R. Kehoe, „Examining strategic fit and misfit in the management of knowledge workers," *ILR Review*, Jg. 70, Nr. 2, S. 308–335, 2017, doi: 10.1177/0019793916654481.

[28] M. Schiffer, *Szenariorobuste Produktarchitekturgestaltung* (Ergebnisse aus der Produktionstechnik Produktionssystematik 2013,32). Aachen: Apprimus, 2013.

[29] „Systems innovation," G. Mulgan und C. Leadbeater, London, 2013. Zugriff am: 5. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://media.nesta.org.uk/documents/systems_innovation_discussion_paper.pdf

[30] Y. Liu, *Organisation von Subskription im Maschinen- und Anlagenbau* (Ergebnisse aus der Produktionstechnik 35/2021). Aachen: Apprimus, 2022.

[31] M. Lennartsson und A. Björnfot, „Step-By-Step Modularity: a roadmap for building service development," *Lean Construction Journal*, Jg. 2010, S. 17–29, 2010.

[32] „Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change: 2021 Reprint," A. Moriet *et al.*, 2019. Zugriff am: 5. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture

[33] J. Ma und G. E. O. Kremer, „A systematic literature review of modular product design (MPD) from the perspective of sustainability," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 86, Nr. 5-8, S. 1509–1539, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8290-9.

[34] J. Yan und C. Feng, „Sustainable design-oriented product modularity combined with 6R concept: a case study of rotor laboratory bench," *Clean Technologies and Environmental Policy*, Jg. 16, Nr. 1, S. 95–109, 2013, doi: 10.1007/s10098-013-0597-3.

[35] MTA Gerüstbau. „www.mta-geruestbau.de: Ihr kompetenter Partner für Gerüstbau." mta-geruestbau.de. http://www.mta-geruestbau.de/ (Zugriff am: 17. Feb. 2023).

[36] Framework Computer. „Framework Laptop 13: Jetzt erhältlich mit AMD Ryzen™ 7040 Series und 13th Gen Intel® Core™." frame.work.de. https://frame.work/de/de (Zugriff am: 17. Feb. 2023).

[37] F. A. S. Piran, D. P. Lacerda, L. F. R. Camargo, C. F. Viero, R. Teixeira und A. Dresch, „Product modularity and its effects on the production process: an analysis in a bus manufacturer," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 88, Nr. 5-8, S. 2331–2343, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8906-8.

[38] H. Krikke, I. Le Blanc und S. van de Velde, „Product modularity and the design of closed-loop supply chains," *California management review*, Jg. 46, Nr. 2, S. 23–39, 2004, doi: 10.2307/41166208.

[39] A.-C. Mellquist, R. Boyer und M. Williander, „Market Endurance: A cost-accounting based metric for measuring value retention for the Circular Economy," *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 179, Art.-Nr. 106117, 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.106117.

[40] Fairphone. „Fairphone 4: Nachhaltig. Langlebig. Fair." shop.fairphone.com. https://shop.fairphone.com/de/ (Zugriff am: 17. Feb. 2023).

[41] e.Volution. „Nachhaltige Plattform." evolution-mobility.com. https://www.evolution-mobility.com/de/plattform/ (Zugriff am: 17. Feb. 2023).

[42] Europäisches Parlament. „Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile." europarl.europa.eu. https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile (Zugriff: 17. Feb. 2023).

[43] Deloitte und Bundesverband der Deutschen Industrie. „Zirkuläre Wirtschaft. Herausforderungen und Chancen für den Industriestandort Deutschland." deloitte.com. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/risk/Zirkul%C3%A4re%20Wirtschaft%20Studie_Deloitte%20und%20BDI.pdf (Zugriff am: 17. Feb. 2023).

[44] M. Henry, D. Schraven, N. Bocken, K. Frenken, M. Hekkert und J. Kirchherr, „The battle of the buzzwords: A comparative review of the circular economy and the sharing economy concepts," *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Jg. 38, S. 1–21, 2021, doi: 10.1016/j.eist.2020.10.008.

[45] P. Morone und R. Navia, „New consumption and production models for a circular economy," *Waste Management & Research,* Jg. 34, Nr. 6, S. 489–490, doi: 10.1177/0734242X16652281.

[46] MIL Maschinen & Industrieanlagen-Leasing. „Unsere Erfahrung hat eine lange Laufzeit: MIL Maschinen & Industrieanlagen-Leasing AG." mil-ag.com. https://mil-ag.com / (Zugriff am: 17. Feb. 2023).

[47] P. Kölsch, J. C. Aurich und C. F. Herder, „Grundlagen zu Produkt-Service Systemen," in *Entwicklung datenbasierter Produkt-Service Systeme: Ein Ansatz zur Realisierung verfügbarkeitsorientierter Geschäftsmodelle*, J. C. Aurich, W. Koch, P. Kölsch und C. Herder, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2019, S. 5-15.

[48] Philips. „Philips." lighting.philips.com. https://www.lighting.philips.com/main/home (Zugriff am: 17. Feb. 2023).

[49] Verlag 320°. „Wie viel E-Schrott durch Reperaturen vermieden wird." 320grad.de. https://320grad.de/2021/05/19/wie-viel-e-schrott-durch-reparaturen-vermieden-wird/ (Zugriff am: 17. Feb. 2023).

[50] J. H. Seelig, S. Birkenfeld, F. Hansen und O. Keich, „Innovative Geschäftsmodelle auf Basis der industriellen Demontage von Fahrzeugbaugruppen," in *Entrepreneurship der Zukunft: Digitale Technologien und der Wandel von Geschäftsmodellen*, S. Gerth und L. Heim, Hg., Wiesbaden: Springer Gabler, 2022, S. 123–142.

[51] Y. Gong, S. Xie, D. Arunachalam, J. Duan und J. Luo, „Blockchain‐based recycling and its impact on recycling performance: A network theory perspective," *Business Strategy and the Environment*, Jg. 31, Nr. 8, S. 3717–3741, 2022, doi: 10.1002/bse.3028.

[52] J. Li, F. Tao, Y. Cheng und L. Zhao, „Big Data in product lifecycle management," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Jg. 81, Nr. 1-4, S. 667-684, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7151-x.

[53] R. Sudarsan, S. J. Fenves, R. D. Sriram und F. Wang, „A product information modeling framework for product lifecycle management," *Computer-Aided Design*, Jg. 37, Nr. 13, S. 1399–1411, 2005, doi: 10.1016/j.cad.2005.02.010.

[54] Y. Zhang, S. Ren, Y. Liu, T. Sakao und D. Huisingh, „A framework for Big Data driven product lifecycle management," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 159, Art.-Nr. 229240, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.172.

[55] L. Wang, Z. Liu, A. Liu und F. Tao, „Artificial intelligence in product lifecycle management," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 114, Nr. 3, S. 771–796, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-06882-1.

[56] V. Venkatasubramanian, „Prognostic and diagnostic monitoring of complex systems for product lifecycle management: Challenges and opportunities," *Computers & Chemical Engineering*, Jg. 39, Nr. 6, S. 1253-1263, 2005, doi: 10.1016/j.compchemeng.2005.02.026.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 4.1:

Riccardo Calchera, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Gerret Lukas, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Lea Niwar, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Seth Schmitz, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen
Martin Welsing, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

4.2 Grüne Re-Montage Upgrade-Fabrik

G. Schuh, W. Mauß, T. Potente, S. Schmitz, T. Adlon, J. Maetschke, H. Neumann, J. Salzwedel, S. Kozielski, M. Luckert, C. Reuter, M. Schmidhuber, J. Witthöft

Gliederung

1 Notwendigkeit einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft 337

2 Upgrade Re-Assembly Factories ermöglichen hochprofitable Wert- und Funktionssteigerung 337

2.1 Eine wert- und funktionssteigernde Kreislaufwirtschaft ist nicht nur für kostenintensive Investitionsgüter möglich 337

2.2 Die Standardisierung von Prozessen ermöglicht die Industrialisierung einer Upgrade-Kreislaufwirtschaft 339

2.3 Die digitale Produktakte ermöglicht durch lebenszyklusübergreifende Informationssingularität den Abbau von Informationsasymmetrien 343

3 Die profitable Transformation zu Green Factories gelingt im Brownfield 345

3.1 Ein neues Modell längerer Lebenszyklen ressourceneffizienter Green Factories 346

3.2 Upgrade und Transformation bestehender Fabriken 348

3.3 Building Information Modeling (BIM) zur Befähigung der Green Factory 353

4 Fazit: Die Green Upgrade Re-Assembly Factory ermöglicht nachhaltige Produktion und ist dabei profitabel 356

5 Literatur 357

doi: 10.24406/publica-968

Kurzfassung

Grüne Re-Montage Upgrade-Fabrik

In diesem Artikel wird die Notwendigkeit eines Paradigmenwechsels hin zu einer nachhaltigeren Upgrade-Kreislaufwirtschaft erörtert. Der Fokus liegt dabei auf der Bedeutung der Umsetzung umfassenderer Maßnahmen anstatt einzelner isolierter Ansätze. Es wird die Green Upgrade Re-Assembly Factory als Lösung für die nachhaltige Aufwertung komplexer Massenprodukte für mehrere Lebenszyklen vorgeschlagen. Der Artikel zeigt die Herausforderungen der Re-Assembly-Prozesse auf (z. B. Unsicherheiten bei der Qualität der Rückläuferprodukte sowie mangelnde Nachhaltigkeitstransparenz) und schlägt Lösungen wie die digitale Produktakte und flexible und anpassungsfähige Prozessdesigns vor. Darüber hinaus wird in dem Artikel dargelegt, dass auch eine Transformation von Produktionsgebäuden in langlebige sowie klimaneutral und ressourceneffizient betreibbare grüne Fabriken notwendig ist. Anhand namhafter Industriebeispiele wird gezeigt, dass sowohl die Umstellung eines Unternehmens auf einen zirkulären Produktionsansatz als auch der Umbau einer Fabrik zu einer Net-Zero-Fabrik profitabel gelingen kann – bereits unter den heutigen Bedingungen.

Schlagwörter: Re-Assembly, Green Factory, Re-Manufacturing, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltige Produktion

Abstract

Green Re-Assembly Upgrade Factory

This article discusses the need for a paradigm shift towards a more sustainable circular upgrade economy, highlighting the importance of implementing comprehensive measures instead of isolated approaches. It proposes the Green Upgrade Re-Assembly Factory to sustainably upgrade complex mass-produced products for multiple life cycles without compromising their performance and attractiveness. The article identifies the challenges faced in re-assembly processes, such as uncertainties in the quality of return products and lack of sustainability transparency. It suggests solutions such as the Digital Product Record and flexible and adaptable process designs. Furthermore, transforming production buildings into climate-neutral green factories designed to have the longest possible life cycle and most resource-efficient operation is necessary. Using prominent industrial examples, the authors show that both the transformation of a company to a circular production approach and the transformation of a factory to a climate-neutral green factory can succeed profitably – already under today's conditions.

Keywords: Re-Assembly, Green Factory, Re-Manufacturing, Circular Economy, Sustainable Production

1 Notwendigkeit einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft

Das lineare Wirtschaftssystem verbraucht aufgrund des „Take-Make-Dispose“-Prinzips endliche Ressourcen und ist nicht nachhaltig. Um zu einer nachhaltigeren Kreislaufwirtschaft zu gelangen, müssen umfassendere Maßnahmen ergriffen werden. Die Produktionstechnik kann ein enormes Nachhaltigkeitspotenzial realisieren, wenn komplexe Massen- und Serienprodukte wie Autos, Haushaltsgeräte, Maschinen und Anlagen systematisch für ein zweites, drittes oder viertes Leben qualifiziert werden. Dabei ist es wichtig, Wertsteigerungen im Aufbereitungsprozess zu berücksichtigen. Durch den Austausch von nur ca. 10 % bis 30 % der Komponenten können komplexe Serienprodukte nahezu den gleichen Wert wie ein neues Produkt erreichen und bis zu 50 % der in der industriellen Produktion eingesetzten Ressourcen und entsprechenden Emissionen einsparen. [1]. So sind je nach Produkt zwei- bis dreifache Margen dieser nachhaltigeren Upgrade-Produkte je Aufbereitungszyklus im Vergleich zu neuen, klassisch produzierten Produkten erzielbar.

Ein Paradigmenwechsel hin zu einer Kreislaufführung von Materialien ist nicht die einzige Herausforderung, welche Unternehmen im Kontext einer nachhaltigen Produktion zu bewältigen haben [2]. Die produktbezogene Wiederaufwertung und Funktionserweiterung ist in einem ebenso funktions- und werterweiterndem Gebäude mit möglichst langem Lebenszyklus und klimaneutralen Betrieb aufzubauen. Dabei ist insbesondere die Transformation von Bestandsfabriken zu langlebigen klimaneutralen Green Factories relevant. Gelingt dies, entstehen sowohl wirtschaftliche als auch strategische Vorteile. Durch eine eigene Erzeugung erneuerbarer Energien können schon heute 70 % bis 90 % der Energieversorgungskosten eines Standorts eingespart werden. Außerdem erhöht sich dessen Resilienz und Versorgungssicherheit. Effizienzsteigerungen, die durch die kontinuierliche Überwachung von Gebäudebetriebsdaten realisiert werden können, sind dabei noch nicht berücksichtigt.

Dieser Beitrag zeigt anhand namhafter Industriebeispiele, dass sowohl die wert- und funktionssteigernde Kreislaufwirtschaft als auch der klimaneutrale Transformationsprozess in einer Fabrik mit heutigen Mitteln schon profitabel möglich sind.

Kapitel 2 geht auf die Herausforderungen und Lösungsansätze für eine wert- und funktionssteigernde Kreislaufwirtschaft ein, Kapitel 3 beschreibt, wie die Transformation bestehender Fabriken zu langlebigen und klimaneutralen Green Factories gelingt, und Kapitel 4 kombiniert diese Themen zur „Green Upgrade Re-Assembly Factory“.

2 Upgrade Re-Assembly Factories ermöglichen hochprofitable Wert- und Funktionssteigerung

In diesem Kapitel werden die Anwendbarkeit von Upgrade Re-Assembly Factories diskutiert, mögliche Prozesse und Organisationsformen vorgestellt und abgeleitet, dass eine digitale Produktakte zur Befähigung der wert- und funktionssteigernden Kreislaufwirtschaft zentral ist.

2.1 Eine wert- und funktionssteigernde Kreislaufwirtschaft ist nicht nur für kostenintensive Investitionsgüter möglich

Auf den ersten Blick scheint die Produktaufbereitung mit gleichzeitiger Funktions- und Wertsteigerung nur für Produkte mit einem hohen Materialwert und hohen Produktions- und Entwicklungskosten, wie Flugzeugen oder Kreuzfahrtschiffen, wirtschaftlich zu sein.

Für Produkte dieser Art sind Nutzungszyklen über mehrere Jahrzehnte bereits Standard. Um diese trotzdem den sich ändernden Gegebenheiten anzupassen, werden über die Jahre immer wieder neue Funktionen und Designanpassungen in die Produkte eingebracht, um Nutzbarkeit und Wert zu erhalten. Beispielhaft ist die Änderung der Fluggastkabine von Passagierflugzeugen: Diese werden im Lebenszyklus eines Flugzeugs ca. alle sieben bis zehn Jahre vollumfänglich erneuert, um Passagieren einen erhöhten Komfort anzubieten ohne dabei das gesamte Flugzeug zu ersetzen. Im Schiffbau sind die Verlängerung von Schiffen zur Kapazitätserweiterung oder Umbauten von konventionellen Schwerölantrieben auf nachhaltigere LNG-Antriebe während der Lebenszeit Industriestandard. Diese Funktionserweiterungen werden aufgrund der geringen Stückzahlen in spezialisierten Werkstattbetrieben vorgenommen. Hochqualifiziertes Fachpersonal führt diese Arbeiten dort in Baustellenmontage durch. Durch den hohen Gesamtwert der Produkte sind diese Ausführungen trotz fehlender Skaleneffekte und Standardisierung wirtschaftlich möglich. Dieses Vorgehen ist jedoch nicht auf Serienprodukte wie bspw. die Erzeugnisse der Automobil- Haushaltsgeräte- oder Gebäudetechnikindustrie übertragbar. In diesen Industrien müssen wie auch in der linearen Produktion der Produkte Skaleneffekte und industrialisierte Prozesse genutzt werden.

Abbildung 1: Vergleich von Produktkategorien für lebensverlängernde Wert- und Funktions steigerung

Um bei Produkten mit vergleichsweise niedrigem Wert (siehe Abbildung 1) die Wiederaufbereitung zu ermöglichen, sind Geschäftsmodelländerungen hin zu kontrollierter Rückführung notwendig. Durch die direkte Kooperation mit Kunden und deren Betrachtung als „unsere Lieferanten von morgen“ geht bspw. die Lorenz GmbH & Co.KG eine strategische Partnerschaft mit den Abnehmern der von ihr hergestellten Wasserzähler ein. Im Zuge dieser Partnerschaft werden jährlich ca. 500.000 Wasserzähler, verkauft zu ca. 29 €, wiederaufbereitet. Auch die ZF Friedrichshafen AG gewinnt durch Kooperationen ca. 10.000 t Kupplungssysteme und Drehmomentwandler für LKW und PKW im Wert von <400 € pro Stück am Standort in Bielefeld von Kunden zurück und arbeitet diese auf. Insgesamt beschäftigt das Unternehmen ca. 1.800 Mitarbeitenden in 25 Aufarbeitungswerken weltweit. Die Aufbereitungen werden in einem industrialisierten Maßstab mit standardisierten Prozessen durchgeführt. Durch den geringeren Materialeinsatz bei niedrigeren Prozessaufwänden können die Unternehmen mit diesen Produkten höhere Margen als mit Neuprodukten erwirtschaften.

Um trotz der Wiedernutzung von Altteilen den Kunden technologischen Fortschritt bieten zu können und somit die Attraktivität der wiederaufbereiteten Produkte zu sichern, muss die Funktionssteigerung beim Wiederaufbereitungsprozess fokussiert werden. Beispielsweise bringt die ZF Friedrichshafen AG im Aufbereitungsprozess von Kupplungsscheiben die Kupplungsbeläge auf den aktuellen Stand der Technik und erreicht damit die Verschleißfestigkeiten neuentwickelter Produkte. Bei Kupplungen ist das Unternehmen durch die Änderung der Teilkreise von Tellerfedern in der Lage, die Federcharakteristik der Kupplungen im Wiederaufbereitungsprozess anzupassen und so die Produktfunktion veränderten Kundenbedürfnissen anzupassen.

Um eine solche funktions- und wertsteigernde Aufbereitung von Serienprodukten mit vergleichsweise gering

erem Wert zu ermöglichen, ist ein deutlich höherer Industrialisierungsgrad erforderlich. Dieser wird in der klassischen linearen Produktion bereits genutzt, um Kosten durch Skaleneffekte zu senken und Produkte für den Endkunden attraktiver anzubieten. Hierzu sind dedizierte Fabriken für die Sortierung und Reinigung, Demontage und Endmontage der Produkte notwendig (vgl. Abbildung 2). Im nächsten Kapitel wird dargestellt, wie die Industrialisierung der Aufbereitungsprozesse in solchen Fabriken gestaltet werden kann.

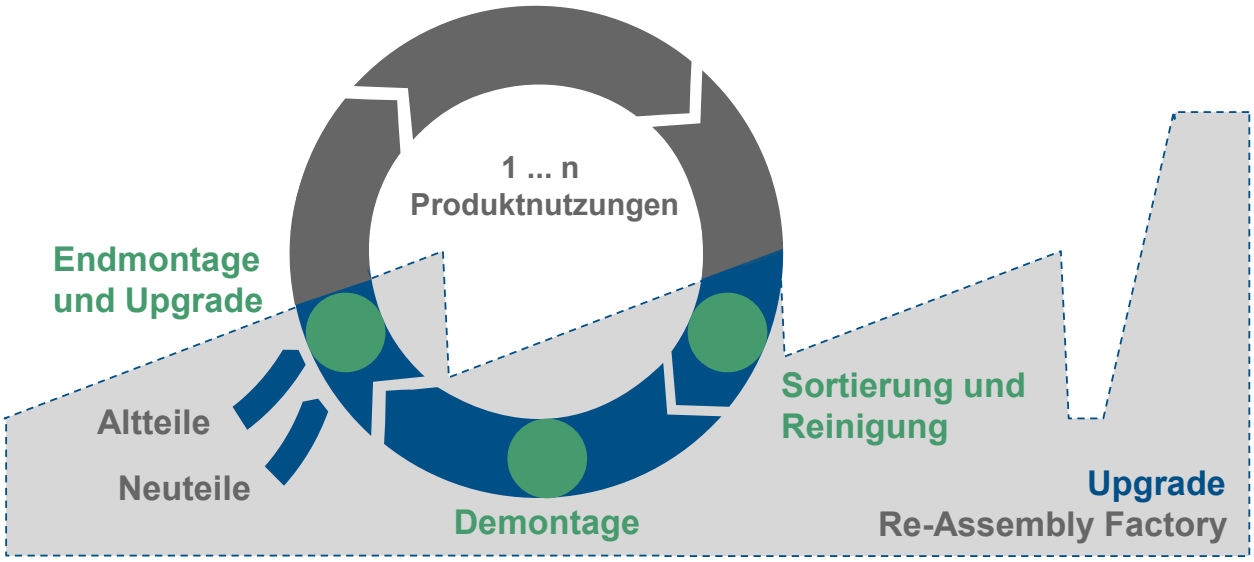


Abbildung 2: Upgrade Re-Assembly Factory

2.2 Die Standardisierung von Prozessen ermöglicht die Industrialisierung einer Upgrade-Kreislaufwirtschaft

Die Industrialisierung einer Produktion führt zu höheren Ausbringungsmengen bei sinkendem Ressourceneinsatz pro Produkt. Dazu wird der Fertigungs- und Montageprozess in standardisierte Arbeitsschritte unterteilt, welche hinsichtlich des Ressourceneinsatzes optimiert werden. Eine Industrialisierung ist immer dann sinnvoll, wenn der initiale Ressourceneinsatz zur Optimierung pro Arbeitsschritt niedriger ist als die durch Skaleneffekte entstehende Summe der eingesparten Aufwände bei der Fertigung. [3] Eine solche Betrachtung muss ebenfalls in der zirkulären Wertschöpfung stattfinden. Neben der Standardisierung der Arbeitsschritte sind die Optimierung der Materialflüsse sowie eine (Teil-)automatisierung von Arbeitsschritten ausschlaggebend.

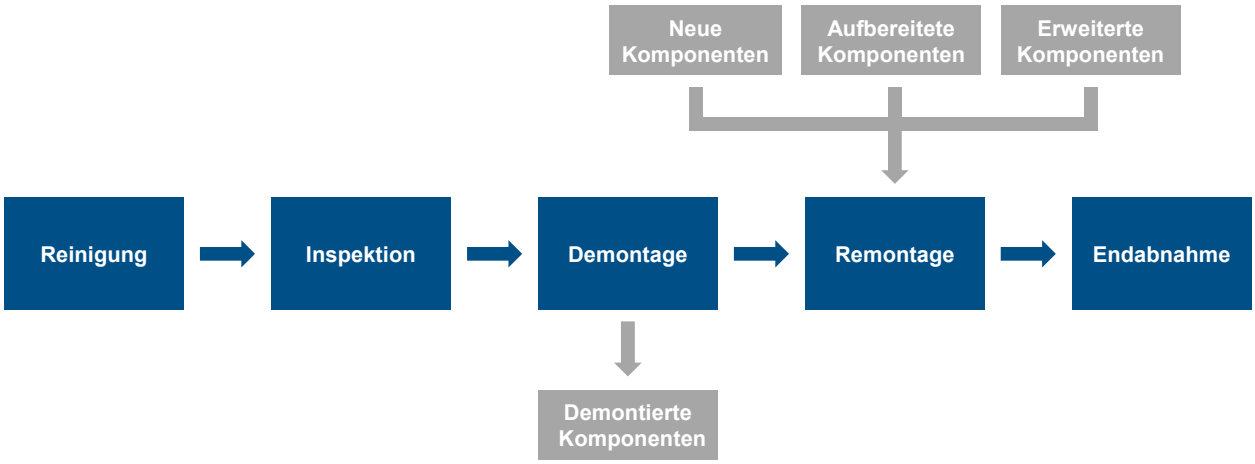


Abbildung 3: Generischer Re-Assembly-Prozess

In Abbildung 3 wird ein generischer Re-Assembly-Prozess dargestellt. Dieser setzt sich aus Reinigung, Inspektion, Demontage, Remontage und Endabnahme zusammen.

Diese Arbeitsschritte variieren abhängig vom Produkt in ihrer Reihenfolge und Häufigkeit. Beispielsweise kann in einigen Anwendungsfällen eine Demontage vor der Reinigung eines Produktes sinnvoll sein, um offensichtlich defekte Produkte auszusortieren und somit Reinigungsprozesse einzusparen.

In manchen Fällen wird der Reinigung noch ein Sortierschritt vorgeschaltet. Damit Kunden eine möglichst niedrige Barriere zur Rücksendung der Produkte haben, akzeptiert bspw. die Lorenz GmbH & Co. KG unsortierte Produkte und übernimmt die Sortierung in Schrott und weiter aufzubereitende Wasserzähler. So wird sichergestellt, dass die vom Unternehmen angestrebte Rückläuferquote von 80 % erreicht wird. Als Nebeneffekt werden außerdem weitere zurückkehrende Produkte wie Wasserzähler anderer Hersteller, Gaszähler und andere Geräte aus der Gebäudetechnik ordnungsgemäß dem Recycling zugeführt. Eine Rückführung an die entsprechenden Hersteller zum Re-Assembly dieser Produkte findet zum Teil statt und wird mit weiteren Herstellern diskutiert.

Im folgenden Reinigungsschritt werden die Produkte von Verschmutzungen befreit, sodass eine Prüfung bzw. Demontage der Komponenten möglich ist. Bei der ZF Friedrichhafen AG findet diese Reinigung der Komponenten in einem späteren Schritt mit einzelnen Komponenten statt und wird durch den Einsatz von Waschanlagen und Durchlaufstrahlanlagen automatisiert. Diese Automatisierung ermöglicht eine Einsparung manueller Reinigungsschritte und erhöht somit die Prozesseffizienz deutlich. In der Inspektion werden die Produkte auf ihre Eignung zur weiteren Verarbeitung geprüft und sortiert. Dabei muss der Fokus der Sortierung auf definierten Komponenten oder Baugruppen liegen, da für diese über die Notwendigkeit einer Demontage im weiteren Verlauf entschieden wird. Einige Komponenten lassen sich nicht per Sichtprüfung auf ihren Zustand überprüfen. Hierunter fallen beispielsweise Elektronikkomponenten wie Platinen. Diese müssen entweder im Gerät mit Hilfe spezieller Testanlagen oder Messmitteln oder nach einer Demontage durch den Lieferanten geprüft werden.

In der Demontage werden in der Entwicklung definierte Komponenten und Bauteile aus dem Produkt demontiert, um weiteren Wiederaufbereitungsschritten zugeführt zu werden. Die Demontage findet auf Basis der Inspektion statt und kann daher je nach Produktzustand variieren. Bei der Remontage werden Komponenten oder Baugruppen in den *Core* (d.h. in das Altprodukt) eingebracht, aus welchem die Komponenten demontiert wurden.

Diese sind, in Abhängigkeit von der kundenseitig gewünschten Konfiguration, aufbereitete oder neue Komponenten, die entweder baugleich zu den vorher ausgebauten Komponenten sind oder neu entwickelte Komponenten mit einer Funktionserweiterung darstellen. Die Produkte werden abschließend im Endabnahmetest durch Qualitätsprüfungen bezüglich Anforderungen, die mindestens denen eines Neuproduktes entsprechen, geprüft und für die Auslieferung verpackt.

Der letzte Prüfschritt spielt vor allem bei Produkten, die geeicht oder zertifiziert werden müssen, eine wichtige Rolle, da hier die Nutzbarkeit des Produkts für den angedachten Einsatzzweck sichergestellt wird. Um eine möglichst effiziente Prüfung zu gewährleisten, setzt die Lorenz GmbH & Co. KG auf einen selbst entwickelten Prüfstand, in dem durch eine große Anzahl von Wasserzählern eine definierte Menge Wasser geleitet wird und anschließend die Messabweichung abgelesen wird. Hierbei werden Geräte aus Neu- und Altteilen gleichermaßen geprüft und erreichen ähnliche Messergebnisse.

In der linearen Produktion variiert der Kundenbedarf hinsichtlich geforderter Menge und Qualität der Produkte, was zu Herausforderungen in der Planung und Gestaltung der Produktion führt. Beim Re-Assembly bleibt die Varianz im Kundenbedarf unverändert, wird aber um eine Varianz im Input erweitert, da Zustand und Menge der angelieferten Rückläuferprodukte unsicher sind. Diese Unsicherheiten haben direkte Auswirkungen auf die Planung und Steuerung der Produktion. Da der genaue Zustand der Cores in vielen Anwendungen erst im Werk bei der Inspektion beurteilt werden kann, ist eine frühzeitige Feinplanung unmöglich. Um diesem Verzug in der Informationsbereitstellung vollständig entgegenzuwirken, ist eine lebenszyklusübergreifende digitale Abbildung des Produkts inkl. der erstellenden Prozesse notwendig (siehe Kapitel 2.3).

Aber auch ohne diese durchgängige Digitalisierung ist eine Wiederaufbereitung möglich. Dazu sind eine hohe Flexibilität sowie robuste Prozesse essenziell. Ein Beispiel hierfür ist die Umsetzung der Demontage unter dem Einsatz von manueller Arbeit und teilautomatisierten Prozessen bei der ZF Friedrichshafen AG. Die Mitarbeitenden dort können an den Demontagestationen flexibel auf die Varianz der eintreffenden Komponenten reagieren. Auch bei der Lorenz GmbH & Co.KG findet die Demontage der Komponenten mit hohem Einsatz von Mitarbeitenden statt. Durch den geringeren Materialeinsatz im Vergleich zur linearen Produktion ist dieser manuelle Einsatz weiterhin profitabel und führt zu zwei- bis dreifach höheren Margen als bei einer Neuproduktion möglich wären. Diese Kombination führt des Weiteren zum Erhalt hochqualifizierter Arbeitsplätze in der produzierenden Industrie am Hochlohnstandort Deutschland.

Auch durch den Einsatz unterschiedlicher Materialfluss- und Demontagekonzepte kann auf die Inputvarianz reagiert werden. Eine Variante der Demontage besteht darin, Produkte zustandsunabhängig bis zu einem vorher definierten Stand zu demontieren, um eine bessere Standardisierung der Demontage und der folgenden Schritte zu ermöglichen. Dies wird im vorher beschriebenen Beispiel der ZF Friedrichshafen AG durchgeführt, da so eine Automatisierung der Reinigung möglich ist.

Ein anderes Demontagekonzept besteht darin, die Produkte nur so weit wie nötig zu demontieren und somit ausschließlich defekte Komponenten auszutauschen (siehe Abbildung 4). Der Vorteil bei dieser Form der Demontage besteht darin, dass nicht notwendige Schritte übersprungen werden, was zu einem effizienteren Gesamtprozess führt. Gleichzeitig werden dem Core durch die situative Durchführung einzelner Aufbereitungsschritte unterschiedliche Funktionen hinzugefügt (siehe Abbildung 5).

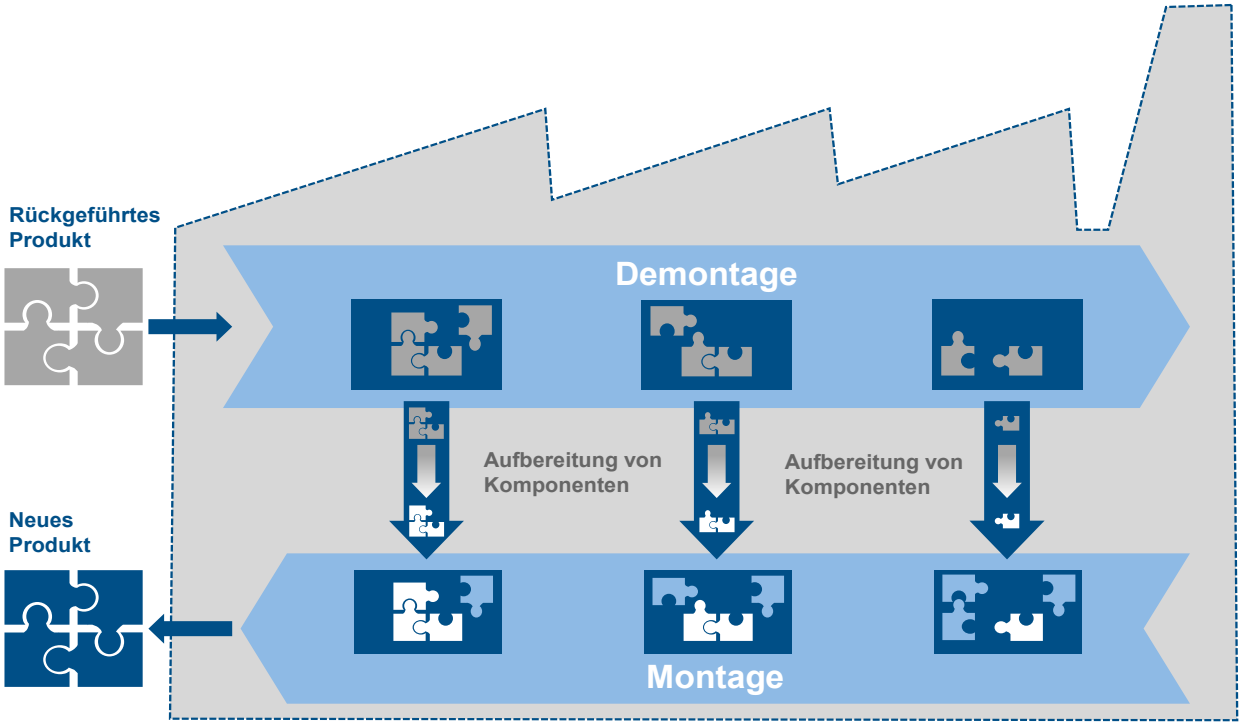


Abbildung 4: Demontage und Montage

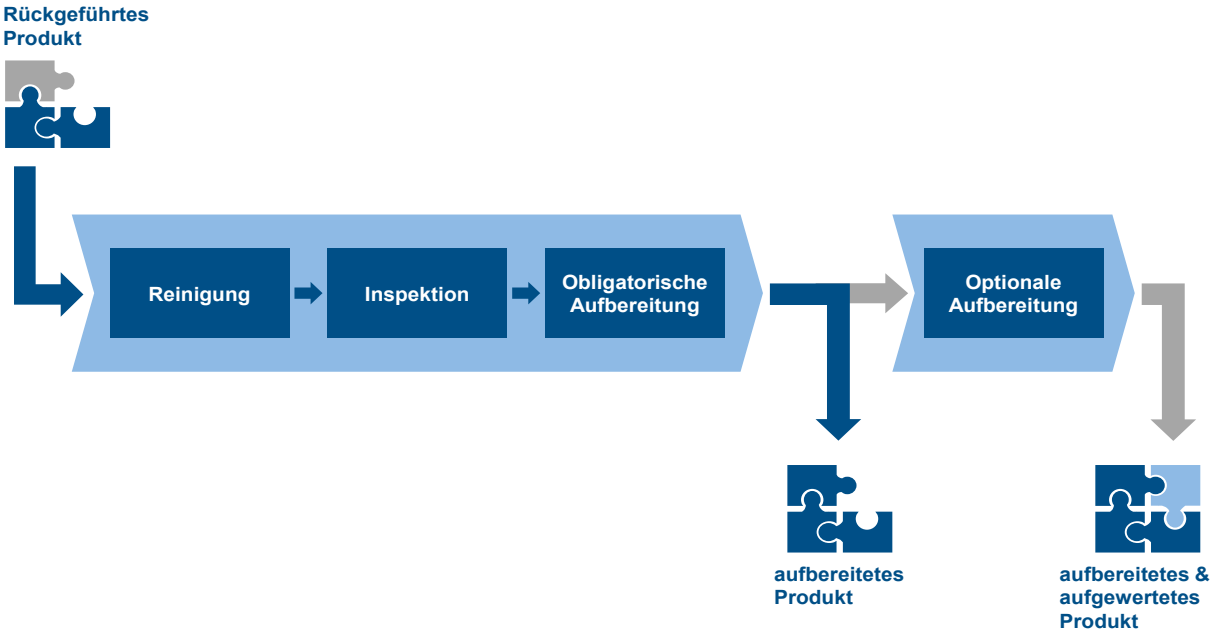


Abbildung 5: Trennung in obligatorische und optionale Aufbereitungsschritte

Ein weiteres Konzept stellt die Kombination von Fertigungs- und Montageschritten von Alt- und Neuteilen dar. Wenn beispielsweise bestimmte Demontage-, Montage- oder Fertigungsschritte nur bei einer geringeren Stückzahl durchgeführt werden, sollten bestehende Automatisierungslösungen aus der linearen Produktion bzw. der Primärproduktion zu verwendet werden, um eine maximale Auslastung der Ressourcen zu gewährleisten. Die ZF Friedrichshafen AG setzt beispielsweise bei der Aufarbeitung von Anpressplatten auf die Verwendung der gleichen Roboter wie in der Neuteilfertigung und erzielt damit

gleiche Fertigungsqualitäten und eine höhere Auslastung kapitalintensiven Equipments (vgl. Abbildung 6).

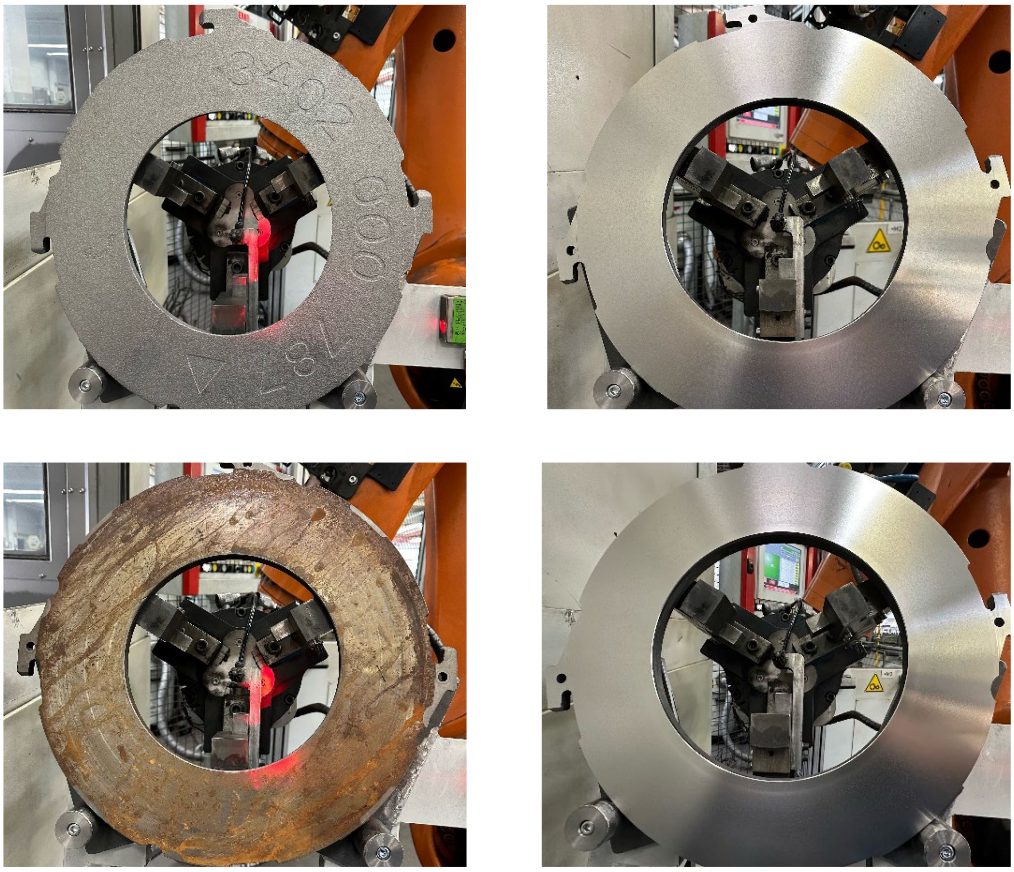


Abbildung 6: Automatisierter Prozess in gemeinsamer Roboterzelle für Neuteilproduktion und Aufbereitung

Neben der effizienten Montage und Demontage ist für eine industrialisierte Fertigung eine effiziente Materialversorgung entscheidend. Um bei niedrigen Beständen dennoch auf die, aufgrund variierender Zustände der eintreffenden Teile, schwankenden Teilebedarfe reagieren zu können, ist ein gewisser Planungsvorlauf notwendig. Auf Grund der Lieferzeiten der Ersatzteile ist es notwendig, eine Materialplanung bereits vor der Inspektion der Produkte durchzuführen und Bestellungen auszulösen. Durch diesen zeitlichen Versatz entsteht eine Trennung der Planung von der Ausführung, wie es auch in der linearen Produktion üblich ist. Die durch die Prognosen entstehenden Informationsunsicherheiten führen unweigerlich zu höheren Lagerbeständen, Prozesskosten und längeren Durchlaufzeiten als in der linearen Produktion. Um diese Nebeneffekte möglichst gering zu halten, müssen diese durch digitale lebenszyklusübergreifende Datendurchgängigkeit reduziert werden.

2.3 Die digitale Produktakte ermöglicht durch lebenszyklusübergreifende Informationssingularität den Abbau von Informationsasymmetrien

Im Re-Assembly sind die Komponentenverfügbarkeit und die Komponentenqualität der rückgeführten Produkte abhängig vom individuellen Produktlebenszyklus. Diese entstehende Unsicherheit über die Beschaffenheit der Rückläufer lässt sich mit Informationen aus den Nutzungsphasen verringern [4]. So lassen sich Qualität bzw. Nutzbarkeit der

Rückläufer für Wiederaufbereitungsprodukte einschätzen, Prozessfolgen sowie Komponentenausbeuten bestimmen und damit Wiederaufbereitungskosten sowie Lagerbestände vorhersagen und letztlich senken.

Tatsächlich könnte schon mit wenigen, gut ausgewählten Informationen eine Grobplanung für Prozessschritte des Re-Assembly erfolgen. Beispielsweise ist der Verschleiß von LKW-Kupplungen abhängig vom Einsatzgebiet des Kraftfahrzeugs, z. B. hinsichtlich bergiger oder urbaner Regionen. Die Informationen über das primäre geografische Einsatzgebiet eines LKWs würde die ZF Friedrichhafen AG daher die Kategorisierung von Kupplungen schon vor der Demontage ermöglichen. Der Reinigungsaufwand für aus dem Feld zurückkehrende Wasserzähler der Lorenz GmbH & Co. KG ist abhängig von der Härte des durchströmenden Wassers. Auch in diesem Fall wäre eine Information über den bisherigen Verbauort des Produkts hilfreich für die Planung der Wiederaufbereitung. Da die Komplexität des Reverse-Logistik-Prozesses, in den zusätzliche Dienstleister eingebunden sind, sehr hoch ist, ist die Weitergabe solcher Informationen heute selten. Diese Form der Informationsasymmetrie zwischen Anbietern und Abnehmern von Alt-Teilen führt dazu, dass aufwendige Prüfungen vorgenommen und teilweise sogar für den tatsächlichen Zustand unnötige Aufbereitungsschritte eingeplant und durchgeführt werden müssen.

Zur notwendigen Überwindung dieser Informationsasymmetrien ist eine stakeholder- und lebenszyklusübergreifende Informationssingularität in einer *digitalen Produktakte* notwendig. [5] Diese verbindet Daten aus der Entwicklungsphase (Stücklisten, Schnittstellen etc.), der Produktion (Bauteileigenschaften, Prozessparameter etc.) sowie den Nutzungsphasen (Lebensdauer, Belastungsprofile etc.) und erweitert somit den digitalen Produktpass, siehe Abbildung 7. [6]

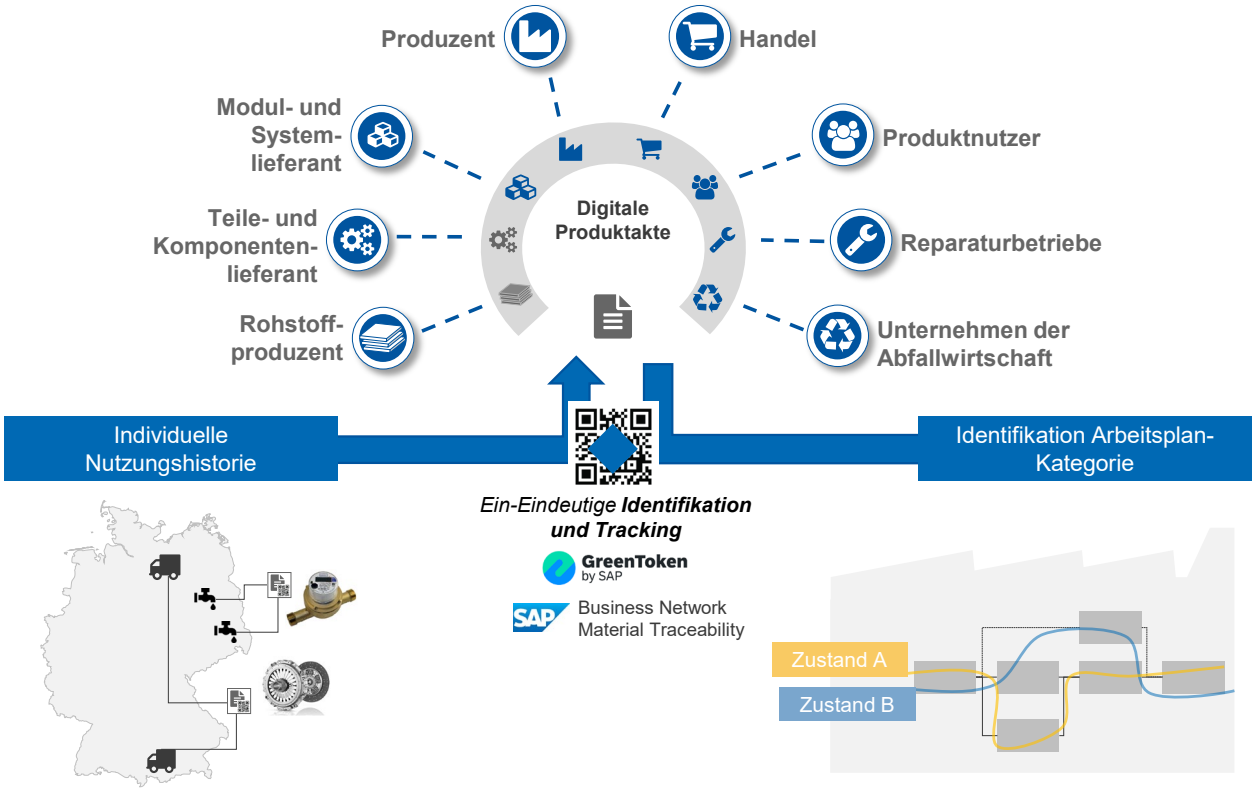


Abbildung 7: Anwendungsbeispiel der digitalen Produktakte

Anders als bei einer klassischen Stückliste ist die digitale Produktakte ein emergentes Dokument. Dies bedeutet, dass eine Änderungshistorie für alle Elemente besteht. Wenn also eine Komponente oder eine Baugruppe ausgetauscht wird, so wird sowohl das alte als auch das neue Element in der digitalen Produktakte vermerkt. Neben dem erstmaligen Fertigungs- bzw. Montagedatum und den nachfolgenden Austauschzeitpunkten in einer Upgrade Re-Assembly Factory kann für jedes Element der Produktstruktur eine Vielzahl weiterer Metadaten in der Produktakte hinterlegt werden. Somit zeigt bereits die Produktstruktur den zentralen Teil des Produktlebenszyklus. [7]

Teilinformationen, beispielsweise aus der Entwicklungsphase des Produkts, müssen dabei nichtöffentlich, veredelt oder verschlüsselt sein, um Geschäftsgeheimnisse zu wahren und Wettbewerbsvorteile zu sichern.

Hierzu ist eine ein-eindeutige-Bezeichnung von Baugruppen etc. durch bspw. *Data Matrix Codes* notwendig, um eine unternehmensübergreifende Nutzbarkeit sicherzustellen. Dafür könnten zukünftig adaptierte Lösungen von SAP basierend auf deren *Green Token* bzw. *Business Network Material Traceability* genutzt werden.

3 Die profitable Transformation zu Green Factories gelingt im Brownfield

Das folgende Kapitel fokussiert die ökologische Nachhaltigkeit der Green Upgrade Re-Assembly Factory und zeigt, dass die Transformation von bestehenden Fabriken hin zu Green Factories profitabel gelingt. Wie im vorangegangenen Kapitel wird auch fabrikseitig ein Lebenszyklusmodell entwickelt (vgl. Kapitel 3.1), welches diese Transformation und weitere Fabrik-Upgrades (vgl. Kapitel 3.2) beschreibt. Gleichermaßen geht dieses Kapitel auf die Zentralität einer stakeholderübergreifenden Datendurchgängigkeit ein und fokussiert dafür die Methode des *Building Information Modelings* (BIM, vgl. Kapitel 3.3).

Die Firma Phoenix Contact GmbH & Co. KG, hier schwerpunktmäßig bezüglich ihrer Standorte in Bad Pyrmont und Blomberg betrachtet, liefert praktische Beispiele für eine erfolgreiche Transformation bestehender Fabriken hin zu Green Factories. Eine initiale Strategiefestlegung des Unternehmens (*X-Degree Compatibility-Strategie*, XDC-Strategie) legte den Grundstein für den Beginn der Transformation des Unternehmens hin zur Klimaneutralität. Das XDC-Modell verwendet wissenschaftliche Erkenntnisse und gesetzliche Vorgaben, um den Einfluss eines Unternehmens auf den Klimawandel zu bewerten. Die Klimametrik gibt an, wie die Erde bis zum Jahr 2050 erwärmt wird, wenn alle Unternehmen gleich emissionsintensiv wie das betrachtete Unternehmen arbeiten würden. Die Berechnung basiert auf der Menge der Emissionen, die benötigt werden, um 1 Million Euro Bruttowertschöpfung zwischen einem Basisjahr und 2050 zu erzeugen. Das allgemeine Vorgehen berücksichtigt dabei alle Emissionen, einschließlich direkter Emissionen aus eigenen oder kontrollierten Quellen (*Scope 1*), indirekter Emissionen aus der Erzeugung zugekaufter Energie (*Scope 2*) und der Emissionen, die in der Wertschöpfungskette des Unternehmens entstehen (*Scope 3*). [8]

Phoenix Contact ordnet die verschiedenen Emission-Scopes konkret wie folgt zu. Scope 1 umfasst die Betriebsgebäude und die Betriebsfahrzeuge. Der Bezug von Strom, der Betrieb der Heizung und die Kühlung zur Eigennutzung ist Teil von Scope 2. Scope 3 beinhaltet das verwendete Material, die Logistik, die Mitarbeitendenmobilität und Dienstreisen. Bei der Umsetzung der Transformation orientiert sich Phoenix Contact an der Vision einer *All-Electric Society*, in der „regenerativ erzeugte elektrische Energie als primäre Energieform weltweit in ausreichendem Maße und vollständig wirtschaftlich“ zur

Verfügung steht. Grundlage dafür ist, dass alle Sektoren von Wirtschaft und Infrastruktur gekoppelt, also umfassend elektrifiziert, vernetzt und automatisiert werden. [9] Gelingt dies, können intelligente Energiemanagementsysteme Energieflüsse optimal steuern und Transport- und Effizienzverluste vermeiden. Ziel ist es, grüne elektrische Energie überall dort zuverlässig zur Verfügung zu stellen, wo sie benötigt wird [10].

3.1 Ein neues Modell längerer Lebenszyklen ressourceneffizienter Green Factories

Um das Nachhaltigkeitspotential in der industriellen Produktion umfassend zu realisieren, darf nicht nur die Verlängerung des Produktlebenszyklus durch Re-Assembly- und Upgrade-Prozesse betrachtet werden. Daneben muss auch der Lebenszyklus der Fabrik ganzheitlich optimiert werden, indem möglichst langlebige und ressourceneffizient betreibbare Green Factories realisiert werden. Langlebig sind Fabriken dann, wenn sie wiederholte Upgrades zur Anpassung an sich verändernde Anforderungen ermöglichen – ganz analog zu den darin gefertigten Produkten.

In der Literatur sind verschiedene Ansätze zur Beschreibung und Unterteilung des Lebenszyklus von Fabriken dargestellt. Allgemein unterteilen alle Ansätze in die drei Hauptphasen Fabrikplanung und -bau, Fabrikbetrieb sowie Fabrikrekonfiguration und -rückbau. Innerhalb dieser Hauptphasen unterscheiden die Ansätze weitere Detailphasen. MÜLLER ET AL. betrachten dabei den Bau der Fabrik separat von ihrer Planung [11]. NEUHÄUSER ET AL. identifizieren eine weitere Phase im Fabriklebenszyklus, die sogenannte Sanierung oder Umplanung. [12] Dies ermöglicht die vertiefte Betrachtung der Umnutzung, Transformation und des Upgrades einer Fabrik und ist daher auch der für diesen Beitrag gewählte Ansatz. DOMBROWSKI ET AL. unterscheiden vier Fabrikplanungsphasen und erhalten insgesamt sieben Lebenszyklusphasen [13]. Derart feingliedrigere Betrachtungen sind im Rahmen dieses Beitrags nicht dienlich, da dieser praxisorientiert die Realisierung der größten Nachhaltigkeitspotenziale durch die klimaneutrale Transformation bestehender Fabriken fokussiert.

Daher soll der Fabriklebenszyklus als übergeordnet dreiphasiges Modell verstanden werden, welches in detaillierte Phasen unterteilt wird. Insgesamt ergeben sich daraus fünf Phasen, welche jedoch nicht alle direkt aufeinander folgen. Zunächst sind diese in einen äußeren Zyklus von Greenfield (Planung und Realisierung) über Brownfield (Realisierung und Betrieb) bis End of Life (Betrieb und Rückbau) unterteilt. Die Phasen des äußeren Zyklus gehen dabei ineinander über. Der Brownfield-Phase wird zusätzlich ein eigener innerer Zyklus zugeordnet, der mehrfach durchlaufen werden kann: Aus dem Betrieb entstehende veränderte Anforderungen an die Fabrik werden im Sinne eines Upgrades selbiger geplant und realisiert (siehe Abbildung 8). Dabei wird die Planung einer Fabrik explizit von ihrer Upgrade-Planung unterschieden. Die Gesamtlebensdauer einer Fabrik verlängert sich in diesem Modell mit der Anzahl der Iterationen des inneren Brownfield-Zyklus – also mit der Zahl der Fabrik-Upgrades.

Der hier hergeleitete Lebenszyklus einer Fabrik startet mit ihrer Planung. Diese wird der Greenfield-Phase zugeordnet, da jede Fabrik initial auf einer Freifläche geplant wurde. Die Phase der Fabrikplanung umfasst beispielsweise die Standortwahl, Festlegung der Produktionsprozesse und -anlagen, Bestimmung des Personalbedarfs und die Festlegung der Gebäudeanforderungen. In dieser Phase werden auch die voraussichtlichen Kosten und die zeitliche Planung für den Bau der Fabrik festgelegt, welche mit den klassischen Vorgehensweisen der Fabrikplanung jedoch häufig verfehlt werden [14]. Die digitale und vernetzte Planung, zum Beispiel durch BIM-basierte Gebäudezwillinge, kann

Planungsfehler und resultierende Zeit- oder Materialverschwendung vermeiden. Daneben profitieren auch die weiteren Phasen des Fabriklebenszyklus von dieser Grundlage (vgl. Kapitel 3.3).

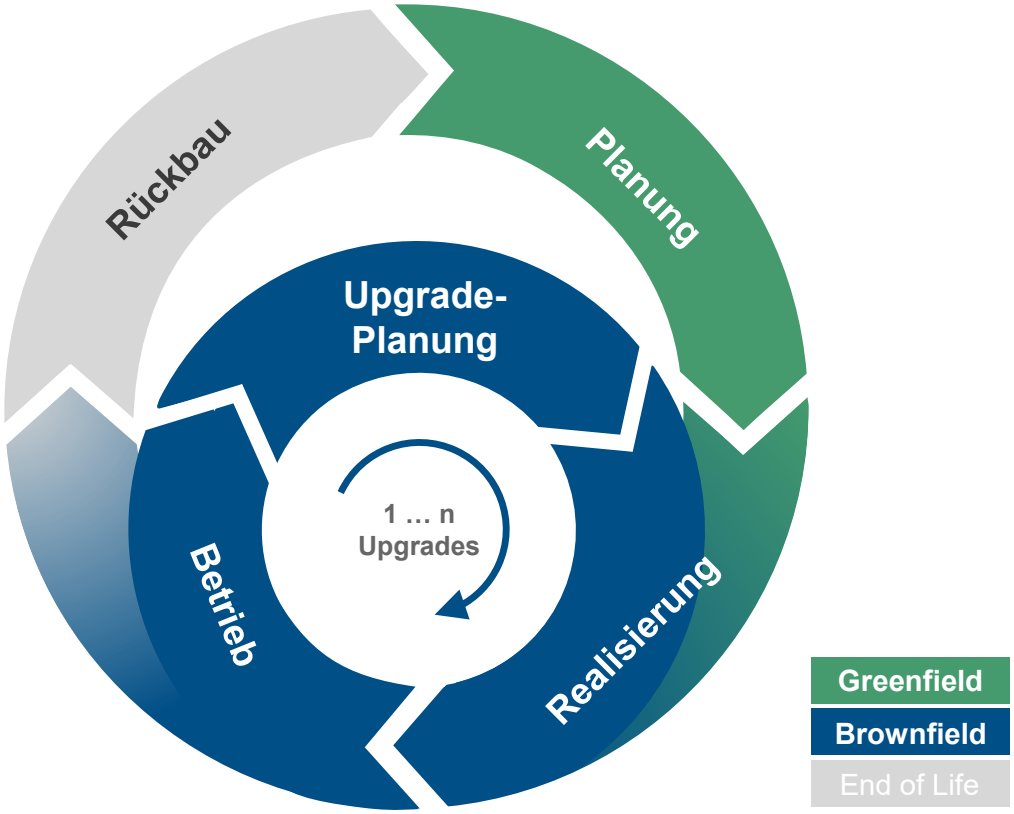


Abbildung 8: Darstellung des Fabriklebenszyklus, inkl. mehrfacher Upgrades im Brownfield

Im Anschluss an die Fabrikplanung folgt die Realisierung – die Fabrik wird gebaut und eingerichtet. Diese Phase beginnt mit der Baustellenvorbereitung und -einrichtung, während Genehmigungsthemen noch der Fabrikplanungsphase zugeordnet werden. Durch Abfallvermeidung oder eine geeignete Abfallsortierung direkt auf der Baustelle können die CO_2-Emissionen der Realisierungsphase reduziert werden. Bezüglich der Baustellenlogistik ergeben sich Stellhebel bezüglich langer Transportwege und der Elektrifizierung der Logistikketten: Elektrisch betriebene Baustellenfahrzeuge können nicht nur CO_2-Emissionen, sondern auch die Feinstaubbelastung und Lärmemissionen verringern. [15], [16] Daneben umfasst die Realisierung die Einrichtung von Produktionsanlagen, Büros und Personalräumen sowie die Installation von (Ab-)Wassersystemen, Maschinen und Elektrizität. In dieser Phase kann insbesondere die Wiederverwendung von Materialien und Möbeln einen Beitrag zu einer klimaneutralen Green Factory liefern. Die Phase der Realisierung endet mit der Fertigstellung der Fabrik und der Inbetriebnahme der Produktion (inkl. Ramp-Up). Während der initialen Realisierung der Fabrik erfolgt der Übergang von der Greenfield- zur Brownfieldphase.

In der folgenden, üblicherweise längsten Phase des Fabriklebenszyklus, wird die Fabrik für ihre vorgesehene Nutzung betrieben. Neben der routinemäßigen Instandhaltung des Gebäudes ist für eine Net-Zero-Fabrik ein kontinuierliches Monitoring der Produktions- und Gebäudebetriebsdaten notwendig, um Optimierungsmaßnahmen gestalten und evaluieren zu können. Dazu zählen bspw. die Detektion von Leitungsverlusten, Steigerung der Energieeffizienz, Vermeidung von Abfall, Steigerung der Anlageneffizienz oder die

Reduzierung des Verbrauchs von Hilfs- und Betriebsstoffen. Stellt sich im Fabrikbetrieb heraus, dass das Produktionsgebäude nicht mehr weitergenutzt werden kann, folgt der Rückbau des Gebäudes und die Umnutzung des Grundstücks. Ansonsten folgen mehrere Upgrade-Zyklen, in der sich die Brownfield-Fabrik wechselnden Anforderungen anpasst (vgl. Kapitel 3.2).

In der Phase des Rückbaus wird die Fabrik stillgelegt und abgerissen. Wenn beim Rückbau die Gebäude und Anlagen vollständig entfernt sind, wird das Gelände rekultiviert und die bleibende Umweltbelastung minimiert. Dabei sollten bestmöglich alle Bauteile der Fabrik recycelt, aufbereitet oder direkt wiederverwendet werden. Eine solche Wiederverwendung von Fabrikbauteilen lässt sich im Rahmen des *Cradle-to-Cradle-Prinzips* umsetzen. Bei Cradle to Cradle handelt es sich um ein Nachhaltigkeitskonzept, dessen Ziel es ist, Produkte und Materialien so zu gestalten, dass sie am Ende ihres Lebenszyklus wiederverwendet, recycelt, biologisch abgebaut oder anderweitig in ihren natürlichen Kreislauf zurückgeführt werden können – ohne negative Auswirkungen auf die Umwelt oder den Menschen. [17]

Phoenix Contact setzt dieses Prinzip beim Ausbau ihres Hauptstandortes durch das Projekt „Gebäude 60“ um, in dem für Cradle to Cradle zertifizierte Produkte und Module verbaut werden: Glastrennwände, Akustikplatten sowie Fenster und Fassaden, die u. a. bezüglich Materialgesundheit, sauberer Luft und Klimaschutz, verantwortlichem Umgang mit Boden und Wasser, sozialer Gerechtigkeit sowie Kreislauffähigkeit zertifiziert sind, können so den Greenfield-Lebenszyklus einer Fabrik neu starten. [18]

Das in diesem Kapitel beschriebene Modell des Fabriklebenszyklus ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung aller für eine Fabrik charakteristischen Zeitpunkte. Durch die Unterscheidung zwischen einer Greenfieldphase, einem inneren Brownfield-Lebenszyklus und der End-of-Life-Phase können Fabriken aus jeder Phase beschrieben werden, ohne dass ein festgelegter Startpunkt benötigt wird. Gleichzeitig ist die Komplexität so begrenzt wie möglich gehalten, indem die Anzahl der Lebenszyklusphasen auf das Ziel des Beitrags, möglichst langlebige und dabei ressourceneffizient betreibbare Green Factories, abgestimmt wurde. Dieses Ziel kann durch ein möglichst häufiges Durchlaufen des Brownfield-Lebenszyklus erreicht werden. Wenn Unternehmen also in der Lage sind, die Produktionsanlagen immer wieder durch Upgrades weiterzuverwenden, werden nicht nur neue Aufwände in Form von CO_2-Emissionen oder Kosten vermieden, sondern auch die initialen Aufwände der Greenfield-Realisierung relativiert.

3.2 Upgrade und Transformation bestehender Fabriken

Brownfield-Fabrik-Upgrades stellen gegenwärtig den am häufigsten auftretenden Planungsfall dar. Die Lebensdauerverlängerung bestehender Fabrikgebäude durch Upgrades realisiert umfassende ökologische und ökonomische Vorteile, da neben Einsparungen von CO_2-Emissionen beispielweise die Versiegelung neuer Flächen vermieden wird oder bereits vorhandene Gebäudestrukturen kostengünstig weitergenutzt werden können. Die anfänglichen Aufwendungen für den Bau und die in den Gebäudestrukturen gebundene Energie fallen nicht erneut an. Daneben werden durch das in Deutschland bis 2050 politisch vorgesehene Net-Zero-Flächenverbrauchsziel Greenfield-Projekte künftig in geringer Zahl möglich oder mit aufwendigeren Ausgleichsmaßnahmen verbunden sein. [19] Dies unterstreicht die Notwendigkeit und Bedeutung der Upgrade-Planung im Brownfield-Fabriklebenszyklus.

Allgemein wird bei der Upgrade-Planung die Fabrik modernisiert oder umgebaut, um die Produktion zu verbessern oder zu erweitern. Dies kann den Austausch von Produktionsanlagen, die Einführung neuer Prozesstechnologien, energetische Sanierungsmaßnahmen oder die Erweiterung des Gebäudes umfassen. Im Sinne einer konsequenten Ausrichtung zu klimaneutralen Net-Zero-Fabriken sollten schon in der ersten Phase des in Kapitel 3.1 hergeleiteten Lebenszyklus der Fabrik, der Planung, mehrmalige Upgrades oder Umnutzungen berücksichtigt werden, damit die Fabrik möglichst lange oder häufig den Brownfield-Lebenszyklus (siehe Abbildung 8) durchlaufen kann. Generell sind Brownfield-Projekte durch die bestehenden Restriktionen in Grundstück und Gebäude deutlich komplexer zu planen und zu realisieren. [19] Entsprechend kann eine vorausschauende Greenfield-Planung die Fabrik-Upgrades der späteren Brownfield-Zyklen deutlich vereinfachen.

Werden bei einer Umplanung einer Bestandsfabrik erstmals Nachhaltigkeitsaspekte umfassend berücksichtigt, handelt es sich nicht nur um ein Upgrade, sondern auch um eine Transformation hin zu einer klimaneutralen Green Factory. Dieser Brownfield-Transformationsprozess besteht aus mehreren Stufen. Zu Beginn steht die Analyse der bestehenden Strukturen, der Energie- und Stoffströme sowie der Emissionen der Fabrik. Auf Basis dieser Daten können erste Handlungsfelder für die Transformation festgelegt werden. Die Definition konkreter Zielsetzungen ergibt sich anschließend aus einer Analyse der Marktsituation sowie der Prognose zukünftiger Entwicklungen, z. B. im Sinne einer Technologievorausschau oder Technikfolgenabschätzung. Dabei können Prognosen für technologische Weiterentwicklungen sowie Förderungspotentiale für Technologien berücksichtigt werden. Weiterhin ist in diesem Zusammenhang die Unternehmensstrategie bezüglich zukünftiger Entwicklungen zu berücksichtigen. [19] Die Zielsetzungen für eine nachhaltige Fabrik können sich dabei beispielsweise aus sozialen, wirtschaftlichen und umwelttechnischen Herausforderungen sowie Möglichkeiten durch die Digitalisierung ergeben [20].

Im Anschluss an die Festlegung einer Zielsetzung für die Transformation sind Umsetzungsmaßnahmen zu identifizieren und zu gewichten. BURGGRÄF ET AL. identifizieren in ihrem Green-Factory-Ordnungsrahmen Transformationsmaßnahmen bezüglich unterschiedlicher Fabrikebenen. Darüber hinaus wird funktionsbezogen zwischen Technologie, Material und Medien sowie Organisation unterschieden. Damit können Maßnahmen für einen konkreten Planungsfall identifiziert werden. Beispielhaft lassen sich der Einsatz von Photovoltaikanlagen, das Verbauen nachhaltiger Materialien und die Erhöhung der Datenqualität als mögliche Maßnahmen nennen. Erstrebenswert ist auch der bewusste Einsatz von Energiespeichern und die Vermeidung (mehrfacher) Energieumwandlungen, z. B. durch den Eigenverbrauch selbsterzeugten regenerativen Gleichstroms. [21] Schon simple Lösungen wie Dachbegrünungen können dabei mehrere positive Auswirkungen haben. Neben der Aufnahme und Umwandlung von CO_2 und NO_2 zeigen sich dadurch deutliche Vorteile im Bereich der Isolierung, mit der Folge reduzierter Heiz- und Kühllasten. Bei der Gewichtung der Maßnahmen geht es darum, die Maßnahmen zu identifizieren, die am meisten oder am kostengünstigsten zur Erfüllung der Zielsetzung beitragen können. [19] Das DGNB-Zertifizierungsprogramm nimmt diese Gewichtung beispielsweise durch ein Punktesystem vor [22].

Spätestens beim Abschluss der eigentlichen Transformation und damit der Upgrade- und Realisierungsphase sollte im Rahmen der anschließenden Betriebsphase im Lebenszyklusmodell ein PDCA-Zyklus (Plan-Do-Check-Act) bzw. ein KVP (kontinuierlicher Verbesserungsprozess) etabliert werden. [19] Dadurch lässt sich die Implementierung von Maßnahmen zur Zielerreichung nachhaltig und auf Basis aktueller Standards beibehalten. Die

Betriebsphase kann dadurch potenziell verlängert und Umplanungsanlässe können reduziert werden.

Die Umsetzung solcher Umplanungs-, Upgrade- oder Transformationsprozesse lässt sich an den praktischen Beispielen von Phoenix Contact und der Lorenz GmbH & Co. KG aufzeigen. Phoenix Contact hat sich das strategische Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 die gesamte Wertschöpfungskette CO_2-neutral zu gestalten. Diese Strategie umfasst die Steigerung der Energieeffizienz um 25 %, die vollständige Versorgung durch erneuerbare Energien und die Steigerung des Anteils der Eigenerzeugung erneuerbarer Energien auf mehr als 30 %. Zusätzlich möchte Phoenix Contact bis 2030 in der Lage sein, alle verbleibenden CO_2-Emissionen zu kompensieren.

Zur Erreichung dieser Ziele am Produktionsstandort Bad Pyrmont ist dessen nachhaltigkeitsbezogene Transformation notwendig. Dabei wurde im Sinne einer All-Electric Society ein Fokus auf Elektrifizierung gelegt. Phoenix Contact hat Bereiche erfasst, die für die Transformation und die Erreichung der dabei gesetzten Ziele zentral sind: bspw. den Fuhrpark, das Blockheizkraftwerk, die PV-Eigenerzeugung oder auch die Materialanlieferung.

Aus der Analyse des Status Quo abgeleitete Maßnahmen schließen einen nahezu vollständigen Umstieg von Blockheizkraftwerken auf Wärmepumpen zur Versorgung des Produktionsstandortes ein. Die Versorgungssicherheit wird durch ein weiterbestehendes, nicht-fossil betriebenes Blockheizkraftwerk gesichert. Dies ermöglicht eine Dekarbonisierung bis 2027 und limitiert Preisschwankungsrisiken durch die reduzierte Verwendung von Erdgas und Biomethan. Die Elektrifizierung und die Umstellung auf Wärmepumpen erfordert jedoch auch ein neues Versorgungskonzept in den Gebäuden, welches unter anderem auf einem Energiespeicher in Form eines Eisspeichers beruht.

Ein Eisspeicher (siehe Abbildung 9) ist ein Wärmespeichersystem, das auf der Speicherung thermischer Energie in Form von Eis basiert. Dieser sogenannte Latentwärmespeicher wird hauptsächlich in Verbindung mit Wärmepumpen verwendet, um die Energieeffizienz von Gebäuden zu verbessern. Das System besteht aus einem Speicherbehälter, der mit Wasser gefüllt ist. Während des Winters wird dem Eisspeicher durch eine Wärmepumpe Energie entzogen, sodass die Flüssigkeit im Eisspeicher gefriert. Die beim Phasenübergang freiwerdende Kristallisationsenergie kann dann zum Heizen des Gebäudes genutzt werden. Durch das etwa 7° C bis 12° C warme Erdreich, in das der Speicher vergraben ist, nimmt der Eisspeicher wieder Energie auf: Das Eis schmilzt. Besonders schnell geht dies an sonnigen Wintertagen, wenn ausreichend Energie durch Solarthermie bereitsteht und die Wärmepumpe dem Eisspeicher weniger oder keine Energie entzieht. Im Sommer wird das im Eisspeicher gespeicherte Eis wieder aufgetaut, um für die Wintersaison Energie zu speichern. Die in diesem Prozess benötigte Energie wird mit der Wärmepumpe den Räumlichkeiten entzogen, um diese zu kühlen. In der Zwischensaison, wenn der Heiz- oder Kühlbedarf nicht so groß ist wie im Winter oder Sommer, wird der Eisspeicher genutzt, um den Wärmepumpenbetrieb zu optimieren. Die Wärmepumpe nutzt dann die im Eisspeicher gespeicherte Energie, um die Heiz- oder Kühlleistung zu erhöhen oder zu verringern, wodurch der Energiebedarf der Wärmepumpe reduziert wird. Auf diese Weise kann der Eisspeicher als Wärmespeicher dienen und die Wärmepumpeneffizienz erhöhen, da diese nur dann arbeitet, wenn sie tatsächlich benötigt wird und nicht kontinuierlich in Betrieb sein muss. [23]–[25]

Weiter soll die Photovoltaik-Eigenproduktion (siehe Abbildung 9) von Strom ausgebaut werden. Dies ermöglicht Phoenix Contact eine Redundanz zum Netzanschluss und ggf.

den Verkauf von Überschussenergie. Zur Steigerung der Energieeffizienz sollen insbesondere auch Transportverluste minimiert werden. Daher sucht Phoenix Contact Synergien mit lokalen Stadtwerken, Landwirten, Klärwerken oder Eigeninitiativen aus der direkten Umgebung. Diese sollen zum Beispiel das benötigte Biogas liefern.

Die Transformation des Standorts Bad Pyrmont hin zu erneuerbaren Energien führt auch zu einer Steigerung der Komplexität der Versorgung. Um diese zu beherrschen und auch zukünftig datenbasierte Entscheidungen zu ermöglichen, ist eine umfassende Digitalisierung des Gebäudes notwendig. Bei Phoenix Contact ist dies mit der Initiative „Smart Building“ umgesetzt. Die selbstentwickelte Gebäudemanagementsoftware *Emalytics*, die auch an Kunden von Phoenix Contact vertrieben wird, dient der Visualisierung und dem Tracking verschiedener Gebäudedaten. Nur wo alle Gewerke und Funktionsbereiche transparent und durchgängig miteinander kommunizieren, kann Energie eingespart und zukunftsfähig automatisiert werden. Das IoT-basierte Framework hinter Emalytics ermöglicht dies durch die intelligente Vernetzung sämtlicher Systeme, Anlagen und Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung (TGA).

Ausbau von Photovoltaik-Anlagen

Eisspeicher zum Energiemanagement

Abbildung 9: Maßnahmen von Phoenix Contact zur Transformation des Standorts Bad Pyrmont

Beim Smart-Building-Ansatz wird der gesamte Lebenszyklus des Gebäudes betrachtet und die Fabrik integral geplant. Dies dient neben der Schonung von Ressourcen, der Umwelt und der menschlichen Gesundheit auch der Erfüllung wirtschaftlicher und menschlicher Bedürfnisse. Als Beispiel kann das sogenannte *Peak Shaving* genannt wer-den. Dabei wird bei Phoenix Contact während des Hochfahrens energieintensiver Anla-gen (z. B. Lötanlagen, Spritzguss, etc.) beispielsweise die Gebäudeklimatisierung zeit-weise ausgeschaltet, um den Energieverbrauch auf weniger als 2,2 MW zu regeln. Hier-durch können vor allem Kosteneinsparungen durch das Lastspitzenmanagement erreicht werden, da für einen Strombezug über dem vereinbarten Kontingent von 2,2 MW ein er-höhter Bereitstellungspreis bezahlt werden muss. Durch die Vernetzung im Smart-Buil-ding-Ansatz wird auch eine automatische Steuerung des Sonnenschutzes ermöglicht, was einer angenehmeren Arbeitsatmosphäre für die Mitarbeitenden dient. Konkret wirkt sich der Smart-Building-Ansatz auf den Energieverbrauch in der Produktion aus: Seit der Einführung der Gebäudemanagementsoftware im Jahr 2019 wurde bis 2022 die Produk-tivität um 30 % gesteigert, während der Energieverbrauch nur um 6 % zunahm. Der Smart-Building-Ansatz unterstützt durch die transparente Darstellung des Energiever-brauchs auch eine energiebewusste Mentalität der Mitarbeitenden und steigert die Moti-vation zur eigenverantwortlichen Energieeinsparung.

Die Transformation steigert nicht nur die Nachhaltigkeit des Standorts in Bad Pyrmont und bietet eine erhöhte Unabhängigkeit und Redundanz vom Stromnetz, sie ist gleichermaßen wirtschaftlich. Aufgrund des Umbaus auf Wärmepumpen und eines generellen

Wachstums des Standortes in Produktion und Entwicklung prognostiziert Phoenix Contact eine Steigerung des Strombedarfs um 10 % bis 20 % bis 2030. Diese Bedarfssteigerung soll durch eine Steigerung der Energieeffizienz vollständig kompensiert werden. Die Investitionen für die Transformation sind zu 30 % Ersatzinvestitionen, z. B. den Ersatz eines Gasheizkessels durch einen elektrischen Heizkessel. Dies zeigt, dass ein Teil der Investitionen für die ökologische Transformation durch Wahl eines günstigen Beschaffungszeitpunkts geringer ausfallen kann – sofern Gebäudemanagement und Instandhaltung eng mit den strategischen Umweltzielen des Unternehmens synchronisiert werden. Zusätzlich ist eine Einmalinvestition von ca. 5 Millionen Euro bis 2030 für z. B. den Ausbau der Photovoltaikanlage und den Umbau des Wärme- und Kältekonzeptes notwendig. Darüber hinaus bedarf es zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit einer Investition in einen Photovoltaik-Park oder ein Windkraftwerk in Kooperation mit z. B. den lokalen Stadtwerken.

Die Einsparungen in den Betriebskosten übersteigen langfristig die prognostizierten Investitionskosten. Durch die Transformation des Standortes sinken die Betriebskosten trotz des steigenden Energiebedarfes. Auf Basis der Kosten pro Kilowattstunde im März 2023 lässt sich dies wie folgt herleiten: Bei der Eigenerzeugung durch Photovoltaik- und Windkraftanlagen liegen die Kosten mit 4 bis 8 Cent pro Kilowattstunde deutlich unter den Beschaffungskosten von Kohle- oder Atomstrom, ca. 30 bis 40 Cent. Phoenix Contact prognostiziert darauf aufbauend langfristig keine Herausforderungen bezüglich der Betriebskosten des transformierten Standorts, sondern bezüglich der Versorgungssicherheit. Dieser Herausforderung begegnet Phoenix Contact, indem Resilienz und Versorgungssicherheit durch lokale Energieerzeugung und die Redundanz der Systeme gesichert werden.

Auch die Lorenz GmbH & Co. KG ist bestrebt, die Nutzungszeit ihrer Fabrik im Brownfield ressourceneffizient zu maximieren. Dabei wird eine Emissionsreduktion der Produktion durch die eigene Erzeugung regenerativer Energien erreicht. Unter anderem verfügt Lorenz über eine Photovoltaik-Anlage mit 573 kWp und erwartet die Baufreigabe für eine Kleinwindkraftanlage mit 24 kWp. Zusammen mit einem ab August einsatzbereiten Stromspeicher mit 490 kWh (basierend auf gebrauchten Fahrzeugbatterien, um zusätzliche negative Umweltwirkungen zu vermeiden) wird umweltfreundliche eigene Stromerzeugung mit hoher Autarkie verbunden. Die Heizenergie wird fast ausschließlich durch die Abwärme einer 500 m entfernten Biogasanlage über eine eigens verlegte Nahwärmeleitung gedeckt. Lediglich in den wenigen Frostwochen wird mit einem 100 kW Scheitholzbrenner zusätzlich geheizt; das Brennholz dafür kommt von Landwirten direkt aus den umliegenden Wäldern. Bei Lorenz werden sowohl Neuprodukte hergestellt als auch gebrauchte Produkte einem Upgrade-Re-Assembly-Prozess unterzogen. Daher sind wiederholt Verschiebungen im Produktportfolio zu beobachten. Zeitweise werden mehr neue als wiederaufbereitete Produkte hergestellt. Nach Ende des ersten Nutzungszyklus der Neuprodukte kommt es zu einer Verlagerung in Richtung der Wiederaufbereitung. Nötige Veränderungen der Produktionslinien und Logistikbereiche (zum Beispiel durch die Reinigung oder den erhöhten Platzbedarf zur Zwischenlagerung der ankommenden Gebrauchtteile) waren nur zügig realisierbar durch ein modulares Hallenkonzept mit verschiebbaren Wänden und abbaubaren Fassadenteilen. Dies unterstreicht, wie wichtig es ist, schon im Rahmen der Greenfield-Planung die für den Brownfield-Lebenszyklus absehbaren Änderungs- und Upgradebedarfe zu berücksichtigen und zu ermöglichen.

Im Rahmen dieses Kapitels wurden Potentiale und mögliche Umsetzungen für Upgrade, Umplanung und Transformation von Fabriken dargestellt. Anhand des Beispiels Phoenix Contact konnte gezeigt werden, dass eine nachhaltigkeitsbezogene Transformation,

beispielsweise im Bereich Energieversorgung und -effizienz, die Betriebskosten eines Standortes langfristig senken kann. Die Potentiale der Transformation von Fabriken gehen jedoch über einen rein finanziellen Aspekt hinaus. So schafft Phoenix Contact durch die eigene Stromproduktion Redundanzen in der Versorgung und erhöht damit die Versorgungssicherheit. Bei der Lorenz GmbH & Co.KG konnte bereits durch die Greenfield-Planung mit einem modularen Hallenkonzept die Flexibilität der Fertigung im Hinblick auf in absehbarer Zeit erforderliche Umplanungen gesteigert werden.

Eine Studie von BURGGRÄF ET. AL. unter 45 Verantwortlichen für die Umsetzung von Planungsprojekten zeigt, dass Brownfield-Fabrikplanungsprojekte als riskant angesehen werden. 38% der Studienteilnehmer schätzen solche auf die Umplanung bestehender Fabriken angelegte Projekte als eher riskant oder hoch riskant ein. [26] Diese Risikobewertung birgt die Gefahr, dass Upgrade- oder Transformationsprozesse – und damit auch notwendige Investitionen für die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft – behindert oder verlangsamt werden. Es bedarf daher Maßnahmen, das Risiko in Verbindung mit dem Upgrade- und Transformationsprozess von Fabriken zu reduzieren. Die transparente Erfassung von Daten, insbesondere Gebäudebetriebsdaten, kann dazu einen Beitrag leisten. Herausforderungen bezüglich Neuerungen und Veränderungen im Brownfield-Zyklus sind dadurch präzise abzubilden und durch digitale Planungstools zu analysieren [27]. Nur so können die passenden Stellschrauben in Richtung eines effizienten und klimaneutralen Gebäude- und Produktionsbetriebs identifiziert werden.

3.3 Building Information Modeling (BIM) zur Befähigung der Green Factory

Der in Kapitel 3.2 skizzierte Transformationsprozess von konventionellen Fabriken hin zu klimaneutralen Green Factories stellt besondere Anforderungen an die Planung. Damit die ressourceneffiziente, aber immer komplexere Gebäudetechnik die Anforderungen der Produktion zuverlässig für die angestrebten langen Fabriklebensdauern erfüllt, ist eine enge Zusammenarbeit aller Gewerke notwendig – insbesondere zwischen Produktions- und TGA-Planung (technische Gebäudeausrüstung). Damit verstärkt die nachhaltige Transformation von Bestandsfabriken bereits zu beobachtende Tendenzen in der Planung: Der traditionelle und multidisziplinäre Bauprozess wird durch die Integration zusätzlicher Schnittstellen immer komplexer [28] und damit aufwendiger. BIM ermöglicht die für die Beherrschung der steigenden Planungskomplexität notwendige Datendurchgängigkeit und Effizienz in Planung und Realisierung. Werden BIM-Modelle mit Gebäudemanagementsystemen kombiniert, lassen sich auch Potenziale bezüglich des Gebäudebetriebs entfalten.

BIM ist eine Methode, die eine systematische, detaillierte und kooperative Erstellung von digitalen dreidimensionalen Modellen von Bauwerken ermöglicht. Durch die Digitalisierung der Planung, des Baus und des Betriebs (Verwaltung, Wartung, Gebäudemanagement, etc.) entsteht ein detailliertes Abbild des realen Bauwerks, das kontinuierlich ergänzt wird. [29]–[31] Das digitale und dreidimensionale (geometrische) Bauwerksmodell in BIM wird von allen beteiligten Planern und Gewerken in allen Lebenszyklusphasen sukzessive erstellt und zusätzlich mit Daten bzw. semantischen Informationen gefüllt. Semantische Informationen werden als Attribute von Objekten im BI-Modell betrachtet und können beispielsweise die Brandschutzklasse, den Energieverbrauch oder den Preis einer Anlage angeben. Somit wird Konsistenz in der Kommunikation und dem Datenaustausch zwischen allen an der Planung und Ausführung Beteiligten sichergestellt. [29], [30]. Darüber hinaus kann das BI-Modell auch um zeitliche, logistische und kaufmännische Aspekte erweitert werden.

BIM verlagert durch eine frühzeitige Erstellung des digitalen Gebäudemodells Planungsaufwände in frühe Planungsphasen. Hierbei können inhaltliche oder geometrische Prüfungen frühzeitig Planungsfehler erkennen und vermeiden. Nachträge und Kostensteigerungen können so vermieden werden, was zu einer höheren Kostensicherheit und Termintreue führt. [30], [32] Solche Einsparungen von Kosten und Zeit sind mit Ressourceneinsparungen verbunden. Neben den genannten Vorteilen von BIM, die hauptsächlich auf Planung, Umplanung, Transformation, Upgrade und Realisierung der Bauwerke zutreffen, gibt es auch Vorteile, die während des Betriebs von Green Factories genutzt werden können.

So kann BIM im Hinblick auf ressourceneffizient und langlebig betreibbare Produktionsgebäude z. B. auch eingesetzt werden, um die energetische Auslegung des Gebäudes zu verbessern und einen effizienteren [12] und damit umweltfreundlicheren Gebäudebetrieb zu ermöglichen. Energieeffizientes Bauen erfordert eine Vielzahl von teilweise komplexen Maßnahmen, die mit den klassischen Planungs- und Umsetzungsmethoden nur schwer zu beherrschen sind. Zusätzlich ist es denkbar, im digitalen BI-Modell bereits frühzeitig zu untersuchen oder zu simulieren, wie verschiedene Planungsvarianten des Bauwerks und der Produktion zu Nachhaltigkeitszielen beitragen. So kann die vorteilhafteste Variante ausgewählt und weiter optimiert werden. Hierfür existieren zwar erste Simulations-Tools, jedoch noch keines, das den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes abdeckt [33].

BIM kann somit für die Green Factory eingesetzt werden, um Komplexität zu beherrschen und möglichst zeiteffizient und ohne Nacharbeiten valide Planungsergebnisse zu erlangen. Zusammenfassend ermöglicht BIM durch das digitale Bauwerksmodell die Integration und Ressourcenoptimierung aller Phasen des Fabriklebenszyklus, über Planung, Realisierung, Betrieb, Umplanung und Rückbau [12]. So kann auch die nachträgliche Erstellung eines BI-Modells im Bestand sinnvoll sein, z. B. vor einem Transformationsprozess, da lebenszyklusübergreifende Vorteile entstehen.

Phoenix Contact plant ein neues Gebäude am Standort Blomberg (siehe Abbildung 10) mittels BIM möglichst energieeffizient. Hierbei wird auf eine Vielzahl von Maßnahmen gesetzt, z. B. moderne Energie- und Klimatechnik, eine Photovoltaik-Anlage mit mehr als 1,5 MWp oder smarte Energiemanagement- und Automationslösungen [34].

Phoenix Contact setzt BIM jedoch nicht nur für die Neuplanung des Standorts Blomberg ein, sondern auch für die Transformation von Bestandsgebäuden am Standort Bad Pyrmont. Die Bestandsgebäude in Bad Pyrmont wurden zunächst traditionell ohne BIM geplant. Nachträglich wurde für den Transformationsprozess ein BI-Modell erstellt, mit dem aktuell der Planungs- und Umsetzungsprozess z. B. in Form von HKLS- (Heizung, Klima, Lüftung und Sanitär) und Elektroplanungen ausgeführt wird.

Neben der Neuplanung in Blomberg und dem Transformationsprozess in Bad Pyrmont kann BIM auch im Betrieb der Fabrikgebäude von Phoenix Contact genutzt werden. Wird der vergleichsweise hohe und langandauernde Energieverbrauch in der Nutzungsphase optimiert, können signifikante Potenziale auf dem Weg zu einer klimaneutralen Green Factory erschlossen werden [33]. So wird das BI-Modell als Ausgangspunkt für Emalytics genutzt. Dazu werden auch ältere Anlagen ohne Datenschnittstellen nachträglich mit *Data Collection Boxes* ausgestattet, um sie im digitalen Zwilling integrieren zu können. Zudem wird die Software im Bereich der Vernetzung von Produktionsanlagen und technischer Gebäudeautomatisierung für das bereits vorgestellte Peak Shaving (vgl. Kapitel 3.2) eingesetzt.

Es wurde gezeigt, dass durch den Einsatz von BIM ein effizienterer Planungs-, Bau-, Bewirtschaftungs-, Umplanungs- und Rückbauprozess erreicht wird. Neben diesen „traditionellen“ Umfängen kann BIM zusätzlich genutzt werden, um Ziele im Bereich der Green Factory, Ressourceneffizienzoptimierung und Gebäudelebensdauerverlängerung im Sinne des Fabriklebenszyklusmodells aus Kapitel 3.1 zu erreichen. So ist mittels BIM z. B. die komplexe energieeffiziente Planung von Bauwerken beherrschbar. Zudem sind Untersuchungen, wie verschiedene Planungsalternativen zu Nachhaltigkeitszielen beitragen, bereits im BI-Modell denkbar. Auch während des Betriebs des Gebäudes kann BIM zur Optimierung beitragen, indem das Bauwerksmodell inkl. aller Daten für andere Softwarelösungen zugänglich gemacht wird. So könnte z. B. zukünftig das Peak Shaving in Emalytics weiterentwickelt werden, um energieintensive Aufgaben dann zu erledigen, wenn der Strom aus erneuerbaren Energien (z. B. aus der eigenen Solaranlage) bereitsteht, um möglichst geringe CO_2-Emissionen und Stromkosten zu erreichen.

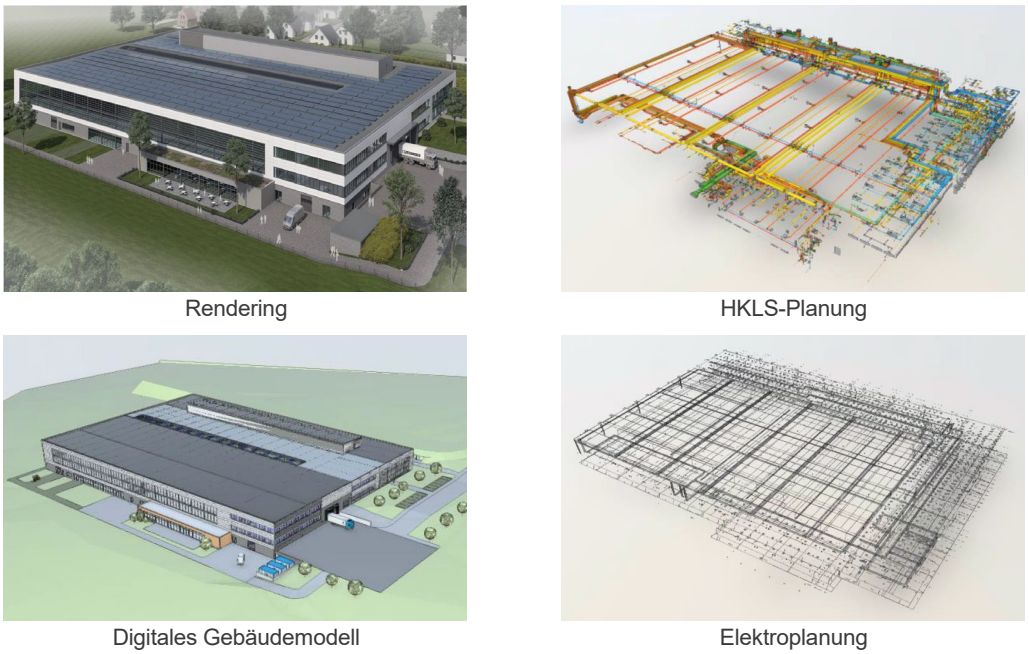


Abbildung 10: BIM-Neuplanung eines Gebäudes von Phoenix Contact am Standort Blomberg

Darüber hinaus zeigt das Beispiel von Phoenix Contact, dass BIM auch für den zukünftig immer relevanteren (vgl. Kapitel 3.2) Brownfield-Bereich sinnvoll einzusetzen ist – einerseits bei der Transformation eines Bestandsgebäudes (Bad Pyrmont), andererseits als Input für einen digitalen Zwilling (Gebäudeautomation oder Peak Shaving). Weiterhin entstehen bei einem Fabrikgebäude, das möglichst lange und ressourceneffizient betrieben werden soll, neue Anforderungen, die von den traditionellen Anforderungen abweichen. Hierbei spielt BIM seine Vorteile aus, da durch die Integration von Gebäudemodellen unterschiedlicher Akteure die für eine All-Electric Society notwendige Sektorenkopplung unterstützt werden kann. Auch komplexere Anforderungen können im transparenten digitalen Gebäudemodell zeit- und kosteneffizient über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes verarbeitet werden. Insbesondere kann BIM Fabrikgebäude, die die Anforderungen wechselnder Produkte und Produktzustände erfüllen müssen, über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg unterstützen. Damit ermöglicht es BIM, die in Kapitel 2 skizzierten Upgrade-Re-Assembly-Prozesse in langlebigen und ressourceneffizient betreibbaren Green Factories zu verorten.

4 Fazit: Die Green Upgrade Re-Assembly Factory ermöglicht nachhaltige Produktion und ist dabei profitabel

Die Green Upgrade Re-Assembly Factory (Abbildung 11) zeigt die notwendige Ausgestaltung eines neuen Fabriktyps, indem sie gleichzeitig die operativen Grundlagen für die wert- und funktionssteigernde Kreislaufwirtschaft legt und eine Produktion bei ökologisch minimalem Fußabdruck ermöglicht.

Es wurde mit namhaften Industriebeispielen demonstriert, dass sowohl die wert- und funktionserweiternde Kreislaufführung von Produkten durch lebensverlängernde Maßnahmen als auch die ökologische Transformation von Fabriken wirtschaftlich profitabel realisierbar sind.

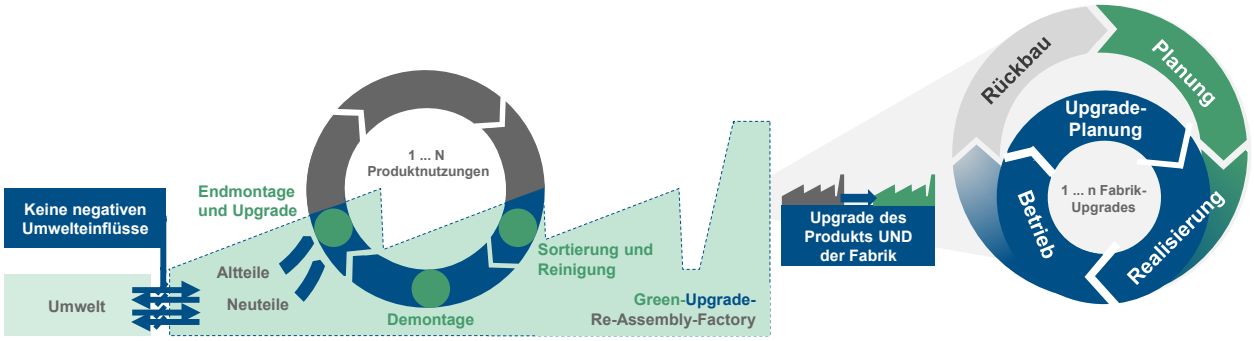


Abbildung 11: Green Upgrade Re-Assembly Factory

Die umfassende Umsetzung nachhaltiger Produktion bietet damit im doppelten Sinne entscheidende Wettbewerbsvorteile gegenüber herkömmlichen Produktionsmethoden: Möglich ist die aus gesellschaftlicher Motivation notwendige Transformation des Wirtschaftens bei gleichzeitiger unternehmensindividueller Rentabilitätssteigerung.

Für eine nachhaltige Produktion ist es unabdingbar, das Produkt wie auch die Fabrik wiederholt an sich verändernde Marktanforderungen anzupassen. Das Upgrade im vorgestellten Konzept der Green Upgrade Re-Assembly Factory ist somit sowohl in Bezug auf das Produkt als auch auf die Fabrik selbst zu verstehen. Dem tragen neue Betrachtungen von Lebenszyklusmodellen für Produkte und Fabriken Rechnung.

Der Beitrag zeigt, dass eine Green Upgrade Re-Assembly Factory rentabel für Unternehmen ist – bereits ohne eine Intensivierung staatlicher Förderung und Forderung von Nachhaltigkeit in der Industrie. Kommt es in den nächsten Jahren, wie erwartet, zu einer Intensivierung staatlicher Anreize, bspw. durch Subventionen oder eine höhere Besteuerung von CO_2-Äquivalenten, steigt die Rentabilität einer nachhaltigen Produktion. Somit profitieren zukünftig insbesondere diejenigen Unternehmen, die ihre Strategie schon heute auf eine Transformation ausgerichtet haben.

5 Literatur

[1] „Ressourceneffizienz durch Remanufacturing - Industrielle Aufarbeitung von Altteilen," (VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 18), U. Lange, Berlin, 2017. Zugriff am: 31. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Kurzanalysen/VDI_ZRE_Kurzanalyse_18_Remanufacturing_bf.pdf

[2] J. Tolzmann. „Deshalb ist die Kreislaufwirtschaft so wichtig." quarks.de. https://www.quarks.de/umwelt/muell/deshalb-ist-die-kreislaufwirtschaft-so-wichtig/ (Zugriff am: 31. Mär. 2023).

[3] M. Baudin und T. H. Netland, *Introduction to manufacturing: An industrial engineering and management perspective*. New York, London: Routledge, 2023.

[4] C. Plociennik *et al.,* „Towards a Digital Lifecycle Passport for the Circular Economy," *Procedia CIRP*, Jg. 105, S. 122–127, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.021.

[5] „Zirkuläre Geschäftsmodelle: Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen," E. G. Hansen *et al.,* München/London, 2021. Zugriff am: 23. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.48669/ceid_2021-8

[6] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). „Was ist ein digitaler Produktpass?" bmuv.de. https://www.bmuv.de /faq/was-ist-ein-digitaler-produktpass (Zugriff am: 23. Mär. 2023).

[7] T. Adisorn, L. Tholen und T. Götz, „Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy," *Energies*, Jg. 14, Nr. 8, Art.-Nr. 2289, 2021, doi: 10.3390/en14082289.

[8] H. Helmke, H.-P. Hafner, F. Gebert und A. Pankiewicz, „Provision of Climate Services—The XDC Model," in *Handbook of Climate Services* (Climate Change Management), W. Leal Filho und D. Jacob, Hg., Cham: Springer, 2020, S. 223–249.

[9] P. Schlegel. „Vier Fragen und Antworten zum Zukunftsbild der All Electric Society." blog.phoenixcontact.com. https://blog.phoenixcontact.com/hr-de/fragen-und-antworten-zur-all-electric-society/ (Zugriff am: 24. Mär. 2023).

[10] T. Sienk. „Integrale Planung von Industriebauten: Basis und Ergebnisse einer umfassenden digitalen Vernetzung." tab.de. https://www.tab.de/artikel/integrale-planung-von-industriebauten-3866278.html (Zugriff am: 24. Mär. 2023).

[11] E. Müller, J. Engelmann, T. Löffler und J. Strauch, *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben,* Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.

[12] T. Neuhäuser, Q. Chen, M. Rösch, A. Hohmann und G. Reinhart, „Building Information Modeling im Fabriklebenszyklus," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 115, Nr. s1, S. 66–69, 2020, doi: 10.3139/104.112331.

[13] U. Dombrowski und S. Ernst, „Effects of Climate Change on Factory Life Cycle," *Procedia CIRP*, Jg. 15, S. 337–342, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.012.

[14] C. Reinema, A. Pompe und P. Nyhuis, „Agiles Projektmanagement: Einsatzpotenziale und Handlungsbedarfe im Rahmen von Fabrikplanungsprojekten," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 108, Nr. 3, S. 113–117, 2013, doi: 10.3139/104.110903.

[15] TU Wien. „Die CO2-neutrale Baustelle." tuwien.at. https://www.tuwien.at/tu-wien/aktuelles/news/news/die-co2-neutrale-baustelle (Zugriff am: 22. Mär. 2023).

[16] „Die CO2 neutrale Baustelle: Ein Beitrag zum Klimaschutz der österreichischen Bauwirtschaft," (Berichte aus Energie- und Umweltforschung 36/2021), R. Obernosterer *et al.*, Villach, 2021. Zugriff am: 24. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2021-37-co2-neutrale-baustelle.pdf

[17] W. McDonough und M. Braungart, *Cradle to cradle: Remaking the way we make things,* New York: North Point Press, 2002.

[18] Cradle to Cradle Products Innovation Institute. „Cradle to Cradle Certified®." c2ccertified.org. https://c2ccertified.org/the-standard (Zugriff am: 24. Mär. 2023).

[19] S. F. Schäfer und S. Flicke, „Nachhaltige Fabrikplanung für die Green Factory: Neue Paradigmen durch das Zielfeld der Nachhaltigkeit," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 117, Nr. 5, S. 264–270, 2022, doi: 10.1515/zwf-2022-1064.

[20] R. G. G. Caiado und O. L. G. Quelhas, „Factories for the Future: Toward Sustainable Smart Manufacturing," in *Responsible Consumption and Production* (Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals), W. Leal Filho, A. M. Azul, L. Brandli, P. G. özuyar und T. Wall, Hg., Cham: Springer, 2020, S. 239–250.

[21] P. Burggräf, T. Adlon, J. Salzwedel, M. Ebade Esfahani, C. Weiler und F. Paßlick, „Green Factories: Maßnahmen zur Neuausrichtung," *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 112, Nr. 5, S. 348–353, 2022, doi: 10.37544/1436-4980-2022-05-78.

[22] DGNB. „Das DGNB System für die Sanierung von Gebäuden." dgnb-system.de. https://www.dgnb-system.de/de/gebaeude/sanierung/ (Zugriff am: 24. Mär. 2023).

[23] Viessmann. „Eis-Energiespeicher: System für Großanlagen." viessmann.de. https://www.viessmann.de/de/produkte/waermepumpe/eis-energiespeicher-systeme-grossanlagen.html (Zugriff am: 24. Mär. 2023).

[24] „Maximierung der Photovoltaik-Eigennutzung mittels Eisspeicher der Supermarkt-Verkaufsstelle Coop Etagnières," A. Boulamanti *et al.,* Basel, 2020. Zugriff am: 24. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://doi.org/10.21256/zhaw-22950

[25] J. Goeke, „Wärmeübertragung in Eisspeichern und Energiegewinne aus dem Erdreich," *Bauphysik*, Jg. 41, Nr. 2, S. 96–103, 2019, doi: 10.1002/bapi.201900001.

[26] P. Burggräf, T. Adlon, S. Schupp und J. Salzwedel, „Risk Assessment in Factory Planning Projects – An Empirical Evaluation of Industrial Practice," in *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems: Proceedings of the 8th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV2021) and the 10th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC2021), Aalborg, Denmark, October/November 2021* (Lecture Notes in Mechanical Engineering), A.-L. Andersen *et al.*, Hg., Cham: Springer, 2022, S. 543–550.

[27] K. Gutenschwager, M. Rabe, S. Spieckermann und S. Wenzel, *Simulation in Produktion und Logistik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.

[28] P. Burggräf, M. Dannapfel, D. Schneidermann, M. Ebade Esfahani und N. Schwamborn, „Integrated Factory Modelling: Using BIM to Disrupt the Interface between Manufacturing and Construction in Factory Planning," in *Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations III (WIT Transactions on The Built Environment 192),* P. De Wilde, L. Mahdjoubi und A. G. Garrigos, Hg., 2019, S. 143–155, doi: 10.2495/BIM190131.

[29] „Stufenplan Digitales Planen und Bauen: Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken," Bundesministerium für Verkehr & digitale Infrastruktur, Berlin, 2015. Zugriff am: 22. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile

[30] C. van Treeck, „Building Information Modeling", in *Gebäude.Technik.Digital: Building Information Modeling* (VDI-Buch), C. Holst-Gydesen, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2016, S. 7-90.

[31] „Reformkommission Bau von Großprojekten: Komplexität beherrschen – kostengerecht, termintreu und effizient: Endbericht," Bundesministerium für Verkehr & digitale Infrastruktur, Berlin, 2015. Zugriff am: 22. Mär. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/reformkommission-bau-grossprojekte-endbericht.pdf?__blob=publicationFile

[32] A. Borrmann, M. König, C. Koch und J. Beetz, „Einführung," in *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis* (VDI-Buch), A. Borrmann, M. König, C. Koch und J. Beetz, Hg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, S. 1–21.

[33] J. K. W. Wong und J. Zhou, „Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review," *Automation in Construction*, Jg. 57, S. 156–165, 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2015.06.003.

[34] T. Sienk. „Mehr Nachhaltigkeit unters Dach." blog.phoenix.contact.com. https://blog.phoenixcontact.com/hr-de/mehr-nachhaltigkeit-unters-dach-nr/ (Zugriff am: 22. Mär. 2023).

Wir danken allen Expert:innen für den regen Austausch und die wertvollen Diskussionen, welche diesem Beitrag sowohl die Praxisperspektive als auch inhaltliche Schärfung ermöglichten.

Die Inhalte für den Vortrag 4.2 erarbeiteten die Autor:innen mit weiteren Expert:innen in dieser Arbeitsgruppe:

Tobias Adlon, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Stefan Kozielski, Boston Consulting Group BCG, Boston
Dr.-Ing. Melanie Luckert, e.Volution GmbH, Aachen
Jan Maetschke, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Wilhelm Mauß, Lorenz GmbH & Co. KG, Schelklingen-Ingstetten
Henning Neumann, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Till Potente, PHOENIX CONTACT Electronics GmbH, Bad Pyrmont
Julia Reker, PHOENIX CONTACT Electronics GmbH, Bad Pyrmont
Dr.-Ing. Christina Reuter, Airbus Defense and Space GmbH, Taufkirchen
Jan Salzwedel, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Matthias Schmidhuber, SAP SE, Walldorf
Dr.-Ing. Seth Schmitz, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Prof. Dr.-Ing. Günther Schuh, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen
Jörg Witthöft, ZF Friedrichshafen AG, Bielefeld

4.3 Neues Qualitätsparadigma für eine nachhaltige Produktion

R. H. Schmitt, F. Sohnius, M. Padrón, R. Günther, J. Keens, D. Buschmann, R. Trappmann, A. Hauptvogel, P. Jatzkowski, F. Lesmeister, Y. Mertens, F. Quito, J. Rauchenberger, S. Stinner

Gliederung

1 Einleitung 363

2 Paradigmenwechsel für qualitätsorientierte Unternehmen 364

2.1 Historische Qualitätsparadigmen produzierender Unternehmen 364

2.2 Nachhaltigkeit als Teil des neuen Qualitätsparadigmas 367

3 Analyse des Paradigmenwechsels aus den Perspektiven des Aachener Qualitätsmanagement-Modells (ACQMM) 369

3.1 Marktperspektive 369

3.2 Führungsperspektive 372

3.3 Betriebsperspektive 375

4 Implikationen für die qualitätsorientierte Leistungsentwicklung und -erbringung 378

5 Zusammenfassung und Ausblick 380

6 Literatur 383

doi: 10.24406/publica-969

Kurzfassung

Neues Qualitätsparadigma für eine nachhaltige Produktion

Aufgrund der Einbettung produzierender Unternehmen in komplexe Gesellschaftssysteme sehen sich diese einer Vielzahl an Forderungen unterschiedlicher Interessengruppen ausgesetzt, die insbesondere eine stärkere Gewichtung der ESG- (Environmental Social & Governance) gegenüber den finanziell-ökonomischen F-Kriterien notwendig machen. Um diesen zukunftsgerichtet begegnen zu können, müssen ESG-Aspekte innerhalb der Strategie- und Entscheidungsfindungsprozesse berücksichtigt und von Grund auf in alle Wertschöpfungsaktivitäten der Unternehmen integriert werden. Innerhalb dieses Beitrags wird aufgezeigt, wie die scheinbare Zunahme der Vielfalt marktseitiger Anforderungen von Unternehmen aufgrund von Nachhaltigkeitsaspekten bewältigt und als Chance ergriffen werden kann. Hierzu werden verschiedene Perspektiven des unternehmerischen Handelns beleuchtet und Potenziale offengelegt, wie Unternehmen ihre Aktivitäten von innen heraus auf ein ESG- und zugleich qualitätsorientiertes, wirtschaftlich tragfähiges Zielbild ausrichten können. Zur Veranschaulichung wird ein konkretes Unternehmensbeispiel vorgestellt. In diesem Kontext bietet das Qualitätsmanagement mit seinem prozess- und kennzahlenorientierten sowie funktionsübergreifenden Charakter die idealen Voraussetzungen für die proaktive Unterstützung dieser Transformation. Zusätzlich zu den bewährten Fähigkeiten und Mechanismen besteht für das Qualitätsmanagement selbst die Notwendigkeit, proaktiv auf sich wandelnde Rahmenbedingungen zu reagieren und sich in Richtung einer „Quality Intelligence“ weiterzuentwickeln.

Schlagwörter: Qualitätsmanagement, Nachhaltigkeit, Anforderungsmanagement, Transformation

Abstract

New Quality Paradigm for Sustainable Production

Due to their embedding in complex social systems, manufacturing companies are exposed to multiple of demands from different interest groups or stakeholders, which make it necessary to give greater weight to ESG- (Environmental Social & Governance) than to financial-economic criteria. To meet these demands in a future-oriented manner, these ESG aspects must be considered within the strategy and decision-making processes and integrated into the entirety of all value-creation activities of the companies. This paper shows how the apparent increase in the diversity of market demands on companies due to sustainability aspects can be managed and seized as an opportunity. To this end, different perspectives of corporate action are illustrated, and potentials are pointed out as to how companies can orient their activities from within towards an ESG- and at the same time quality-oriented, economically viable target image. To highlight this, a concrete company example is presented. In this context, quality management with its process- and KPI-oriented as well as cross-functional character offers the ideal prerequisites for proactively supporting this transformation. In addition to the proven capabilities and mechanisms, there is a need for Q*uality Management* itself to react proactively to changing framework conditions and to transform itself in the direction of *"Quality Intelligence"*.

Keywords: Quality Management, Sustainability, Requirement Engineering, Transformation

1 Einleitung

Produzierende Unternehmen sehen sich in der Dynamik ihres Umfelds zunehmend mit Herausforderungen hinsichtlich der Energieversorgung, der Überwachung globaler Lieferketten und dem verantwortungsvollen Umgang mit begrenzten Ressourcen konfrontiert. Verschärft werden die hieraus entstehenden Unsicherheiten durch Ressourcenknappheit ausgelöste Disruptionen in der Lieferkette, politische Krisen und die bereits wahrnehmbaren Folgen des Klimawandels [1].

Innerhalb dieses volatilen und krisenbehafteten, wirtschaftlichen Umfelds wird der Aspekt der Nachhaltigkeit zunehmend als Erfolgsfaktor gewichtet [2]. Seit der Verabschiedung des Pariser Klimaabkommens im Jahre 2015 und der mit dieser beschlossenen Reduktion des weltweiten Anstiegs der Durchschnittstemperatur auf unter 1,5°C gegenüber vorindustriellen Werten wandeln sich Rahmenbedingungen des unternehmerischen Wirkens durch rechtliche Anforderungen. [2], [3] Ein Beispiel hierzu stellt das Gesetz zur Stärkung der nichtfinanziellen Berichterstattung der Unternehmen in ihren Lageberichten „CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz“ dar (CSR-RUG). Dieses verpflichtet kapitalorientierte Unternehmen mit mehr als 500 Mitarbeitenden seit 2017 in ihren Lageberichten auf Umwelt-, Sozial- und Arbeitnehmendenbelange, auf die Achtung der Menschenrechte und auf die Bekämpfung von Korruption und Bestechung einzugehen [4]. Mit dem Jahreswechsel ist nun auch das „Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz“ (LkSG) in Kraft getreten, das den Schutz der Menschenrechte in globalen Lieferketten fokussiert und Unternehmen zu deren Sicherstellung verpflichtet [5]. Darüber hinaus wird durch aktuelle Bemühungen der „Corporate Sustainability Reporting Directive“ (CSRD) schrittweise die Verpflichtung zur Nachhaltigkeitsberichterstattung für Unternehmen auf europäischer Ebene eingeführt. Damit soll die nichtfinanzielle Berichterstattung deutlich ausgeweitet und die Unternehmen verpflichtet werden, über die Auswirkungen von Nachhaltigkeitsaspekten auf das Geschäftsergebnis, ihre Lage und ihren Geschäftsverlauf sowie über die Auswirkungen dieser Aspekte auf Menschen und Umwelt zu berichten. [6] Ausgehend von der aktuellen Entwicklung ist künftig mit weiteren Regularien in Bezug auf die Einhaltung und Offenlegung von Aspekten und Kennzahlen im Nachhaltigkeitskontext zu rechnen. Die damit verbundenen Anforderungen münden in Verbindung zu den bereits bestehenden Herausforderungen in einer erhöhten Komplexität für die strategische und operative Ausrichtung produzierender Unternehmen.

Durch die Einbindung von Unternehmen in Gesellschaftssysteme sind neben rechtlichen Vorgaben weitere nachhaltigkeitsorientierte Forderungen externer Interessengruppen zu berücksichtigen [7]. Diese wechselseitigen Interaktionen mit unterschiedlichen Interessengruppen unterliegen einem stetigen Wandel [8]. Beispielsweise lässt sich feststellen, dass immer mehr Konsument:innen ein zunehmendes Umweltbewusstsein entwickeln, sodass sich Nachhaltigkeit als relevanter Wettbewerbsfaktor herauskristallisiert. Umfragen belegen, dass 48 % der Konsument:innen bereit sind, einen erhöhten Angebotspreis für nachhaltigere Produkte zu akzeptieren [9]. Gleichzeitig kann Nachhaltigkeit als Innovationstreiber fungieren, indem eine proaktive Berücksichtigung im Rahmen der Leistungsentwicklung erfolgt. Weiter zu nennen sind in diesem Zusammenhang geänderte Voraussetzung für die Sicherung personeller und finanzieller Ressourcen aufgrund der Attraktivität eines Unternehmens für den Arbeits- als auch Finanzmarkt. [7]

Eine wesentliche Voraussetzung für den langfristigen Erfolg von Unternehmen ist nicht nur die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der eigenen Organisation an sich verändernde Bedingungen, sondern ebenfalls die Adaption der Unternehmens- und Produktpositionierung an die veränderten Kundenbedürfnisse. Zur Sicherung einer langfristig

stabilen Marktposition besteht eine wichtige Aufgabe darin, Veränderungen frühzeitig zu erkennen, neue Märkte zu schaffen und Kundenbedürfnisse gezielt zu wecken. [10] Dabei müssen Unternehmen mit dem Ziel der langfristigen Gewinnsteigerung bei permanenter Liquiditätssicherung wirtschaften [11]. Die zusätzlichen Nachhaltigkeitsanforderungen erfordern eine Anpassung der Unternehmensführung, um das dargestellte Spannungsfeld effizient zu gestalten [2].

Die Ausführungen verdeutlichen, dass das Anforderungsumfeld der Unternehmen vielschichtiger wird. Eine anforderungsgerechte Entscheidungsfindung bedarf daher standardisierter Mechanismen zur Identifikation und Bewertung wesentlicher Interessengruppen sowie die Berücksichtigung hiermit einhergehender Anforderungen im Rahmen der unternehmerischen Zielsetzungs- und Strategieentwicklungsprozesse. Die angestoßene Neuausrichtung normativer Unternehmensvorgaben erfordert im Weiteren die entsprechende Paradigmenerweiterung innerhalb der unternehmerischen Identität auf allen Ebenen. Durch seinen strukturell interdisziplinären und funktionsübergreifenden Charakter ergeben sich daher insbesondere für das Qualitätsmanagement weitreichende Aufgaben, um die nachhaltigkeitsorientierte Transformation entscheidend zu befähigen. Die organisatorischen und technischen Herausforderungen bestehen darin, proaktiv auf das wandelnde Spannungsfeld und die daraus resultierenden Rahmenbedingungen zu reagieren – und sich dabei aus einer normativ-konservativen Rolle zu lösen. Im Verlauf dieses Beitrags wird aufgezeigt, wie die Vielfalt marktseitiger Anforderungen von Unternehmen bewältigt und eine Transformation des Qualitätsmanagements als Chance ergriffen werden kann.

2 Paradigmenwechsel für qualitätsorientierte Unternehmen

Vor dem Hintergrund der Entwicklung des heutigen Qualitätswesens wird die Notwendigkeit und Aktualität eines neuen Paradigmas deutlich. Anforderungen der industriellen Praxis und deren Auswirkungen prägen das heutige Qualitätsmanagement. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Nachhaltigkeit für produzierende Unternehmen beeinflussen aktuelle Bewegungen den nun unumgänglichen Paradigmenwechsel.

2.1 Historische Qualitätsparadigmen produzierender Unternehmen

Die Transformation des Qualitätsmanagements ist von jeher eng mit der stetig fortschreitenden Entwicklung des unternehmerischen Umfelds verbunden. Bereits die erste industriellen Revolution Ende des 18. Jahrhunderts und die im Zuge dieser entstandenen Mechanisierung der Produktion zeugt von diesem Umstand. [10], [12] Mit Aufkommen der Massen- und Fließbandfertigung erfolgte ein Umschwung im Qualitätsdenken im Vergleich zur Einzelfertigung. Durch die veränderten Rahmenbedingungen der Produktionsketten hielten Inspektion und das Aussortieren fehlerhafter Komponenten Einzug [10]. Die Entwicklung der Qualitätskontrolle basierend auf statistischen Verfahren in den 1920er Jahren trug im Zuge der Steigerung der Produktionsvolumina der Unmöglichkeit einer vollständigen Prüfung Rechnung. Diese legten die Grundlage zur gezielten Steuerung der Prozesse und der daraus resultierenden Reduktion des Ausschussaufkommens. Hiermit wurde der Grundstein des Wandels von einem rein reaktiven (Qualitätskontrolle) hin zu einem proaktiven Qualitätsansatz (Qualitätssicherung) gelegt. [13], [14]

Zu Beginn der 1950er Jahre gewannen Fehlerkosten als Kontroll- und Steuerungskennzahlen vermehrt an Bedeutung. Im Jahr 1956 wurde der Ansatz der Total Quality Control

(TQC) entwickelt, welcher auf der Erkenntnis basiert, dass Fehler in den frühen Phasen der Produktentstehung zu hohen Kosten im späteren Verlauf führen. [10]

Parallel zu den dargelegten Bewegungen, die vor allem in den USA stattfanden, wurde in Japan eine radikale Wende zur gezielten Ausrichtung der Produktion auf Marktanforderungen initiiert. Zum Zwecke der stetigen Optimierung des Prozessgeschehens wurde ein systematisches Vorgehen entwickelt, welches als Deming- oder *Plan-Do-Check-Act*-Zyklus (PDCA) bekannt ist und in vielen Unternehmen weiterhin ein Basiswerkzeug der kontinuierlichen Verbesserung darstellt. [13] Der PDCA-Zyklus bildet darüber hinaus die Basis für viele aktuelle Managementsysteme. [10]

Mitte der 1980er prägt der Begriff Total Quality Management (TQM) das Verständnis eines ganzheitliches Qualitätsmanagementkonzepts. [15] Es versteht Qualität als Aufgabe aller Bereiche und Mitarbeitenden im Unternehmen und zugleich als Philosophie der gesamten Organisation [16]. Gleichzeitig startete Motorola die Initiative zur Verbesserung der Kundenzufriedenheit und entwickelte die Six-Sigma-Methode und den systematischen Ansatz *Define-Measure-Analyze-Improve-Control* (DMAIC). [10], [16]

Ganzheitliche Qualitätsmanagementkonzepte führte die International Organization for Standardization (ISO) 1987 mit der Veröffentlichung der DIN ISO 9000ff. normativ ein, die seit dem Jahr 2000 als „Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen“ bezeichnet wird. [10], [14] Ein wesentlicher Beitrag dieser Norm ist die vorherrschende Definition von Qualität als der „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“ [17]. Diese Definition betont die Notwendigkeit zur Berücksichtigung marktseitiger Anforderungen im Rahmen der Leistungserstellung.

Im Jahre 2011 wurde der Öffentlichkeit erstmals der Begriff „Industrie 4.0“, als Vision der Bundesregierung für den Industriestandort Deutschland vorgestellt [14]. Nach der Dampfmaschine (1.), der Massen- und Fließbandfertigung (2.) und der Einführung rechnergestützter Steuerungen und Roboter (3.) sollte mit dem „Internet der Dinge“ und der Umsetzung cyber-physischer Systeme die „4. Industrielle Revolution“ zur Produktivitätssteigerung initiiert werden [18]. Durch die vertikale Vernetzung eingebetteter Systeme mit wertschöpfenden und betriebswirtschaftlichen Prozessen und deren horizontale Vernetzung zu verteilten, in Echtzeit steuerbaren Wertschöpfungsnetzwerken, ergeben sich für das Qualitätsmanagement neue Herausforderungen und Potenziale. Dies betrifft allen voran die Bereiche der Datenqualität, -verarbeitung und -sicherung. [10], [18] Der technologische Fortschritt erfordert und befähigt die Erweiterung bestehender Methodenbaukästen des Qualitätsmanagements um die Analyse von Big Data unter Zuhilfenahme fortschrittlicher Ansätze, beispielsweise aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz.

Ergänzend zu dem Technologieschwerpunkt der Industrie 4.0 halten Themen wie Nachhaltigkeit, Resilienz, aber auch die Menschenzentrierung Einzug in den unternehmerischen Betrachtungsfokus und stoßen folglich eine erneute Weiterentwicklung des Qualitätswesens an [19]. Sie erfordert die Abwägung ökonomischer, ökologischer und sozialer Wirkungen und Wechselwirkungen. Durch den Wandel des Nachhaltigkeitsverständnisses erhält diese ihre heutige Relevanz.

Die älteste Verwendung des Nachhaltigkeitsbegriffs im deutschen Sprachraum geht auf das Jahr 1713 zurück. In der Abhandlung „Sylvicultura Oeconomica“ wurde demnach eine „kontinuierliche, beständige und nachhaltende Nutzung“ des Waldes gefordert, um die Abholzung entsprechend der Grenzen einer umsetzbaren Aufforstung anzugleichen. [20], [21] Erst im Jahre 1953 mit der Veröffentlichung der „Social Responsibilities of the Businessman“ rückten die sozialen Verpflichtungen eines Unternehmens in den Diskurs. Innerhalb dieser wird dargelegt, dass Unternehmen in der Verantwortlichkeit stehen, die

Auswirkungen ihres Handelns auf alle Interessengruppen zu berücksichtigen, einschließlich der Mitarbeitenden, Kundschaft und breiteren Gemeinschaft. [22], [23]

Den Beginn der wissenschaftlichen Präsenz des Nachhaltigkeitsressorts markierte erst die vom Club of Rome im Jahre 1972 in Auftrag gegebene Studie „Limits of Growth“. [24], [25] Die Analyse postulierte, dass unbegrenztes Wachstum nicht möglich sei und unvermeidlich zum Kollaps des Systems führen würde [26]. In der Veröffentlichung von „Our Common Future“ 1987, dem Bericht der World Commission on Environment und Development, wird das Verständnis einer nachhaltigen Entwicklung zur Befriedigung der Bedürfnisse der gegenwärtigen Generation ohne Kompromittierung der Bedürfnisse zukünftiger Generationen festgehalten. Darüber hinaus unterscheidet der Bericht die Nachhaltigkeitsdimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales. [20], [27]

In Ergänzung zu den finanziell-ökonomischen Kennzahlen (F-Kriterien) wurde die Definition der drei Säulen des nachhaltigen Wirtschaftens (ESG-Kriterien) im Jahre 2004 von der Global Compact Initiative der Vereinten Nationen im Bericht „Who Cares Wins“ offiziell eingeführt. *Environmental* (E) umfasst Themen des Klima- und Umweltschutzes. Darunter werden die Bemühungen eines Unternehmens in Bezug auf z.B. Treibhausgasemissionen und Umweltmanagement bewertet. Der Begriff *Social* (S) berücksichtigt unter anderem Aspekte der Menschenrechte, gesellschaftliche Stabilität und Arbeitsschutzgesetze. Unter *Governance* (G) werden die Aspekte zusammengefasst, die die internen Prozesse und Verantwortlichkeiten wie Kontrollverfahren, wettbewerbswidrige Praktiken und die Einhaltung von Gesetzen bewerten. [28], [29]

Die Verabschiedung der 17 „Sustainability Development Goals“ (SDG) im Jahr 2015 im Rahmen der Agenda 2030 der Vereinten Nationen hat die Bedeutung der drei Nachhaltigkeitsdimensionen unterstrichen. Im Ergebnisdokument des Gipfeltreffens heißt es: „Sie sind integriert und unteilbar und tragen in ausgewogener Weise den drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung Rechnung: der wirtschaftlichen, der sozialen und der ökologischen Dimension“ [30]. Mit der Formulierung der SDG verständigte sich die globale Staatengemeinschaft erstmals auf Handlungsfelder und schuf einen Orientierungsrahmen für Unternehmen [31].

Auch in der Gesellschaft ist das Bewusstsein angekommen, dass der bisher eingeschlagene Weg im Umgang mit begrenzten Ressourcen nicht weiter beschritten werden kann. Überaus klar wird dies am Beispiel des „World Overshoot Day“ am 28. Juli 2022, nach welchem der jährliche Verbrauch biologoscher Ressourcen nicht mehr durch natürliche Regeneration gedeckt werden kann. [32] Normative Rahmenbedingungen werden nun von Seiten der Regierung geschaffen. Jedoch zeigt sich in jüngster Vergangenheit zunehmend, dass darüber hinaus weitere Interessens- und Anspruchsgruppen und die durch diese spezifizierten Anforderungen zu berücksichtigen sind, welche einen Einfluss auf das unternehmerische Handeln und damit auf das Selbstverständnis der Unternehmen nehmen (Abbildung 1).

Auch in der Gesellschaft ist das Bewusstsein angekommen, dass der bisher eingeschlagene Weg im Umgang mit begrenzten Ressourcen nicht weiter beschritten werden kann. Überaus klar wird dies am Beispiel des „World Overshoot Day“ am 28. Juli 2022, nach welchem der jährliche Verbrauch biologoscher Ressourcen nicht mehr durch natürliche Regeneration gedeckt werden kann. [32] Normative Rahmenbedingungen werden nun von Seiten der Regierung geschaffen. Jedoch zeigt sich in jüngster Vergangenheit zunehmend, dass darüber hinaus weitere Interessens- und Anspruchsgruppen und die durch diese spezifizierten Anforderungen zu berücksichtigen sind, welche einen Einfluss

auf das unternehmerische Handeln und damit auf das Selbstverständnis der Unternehmen nehmen (Abbildung 1).

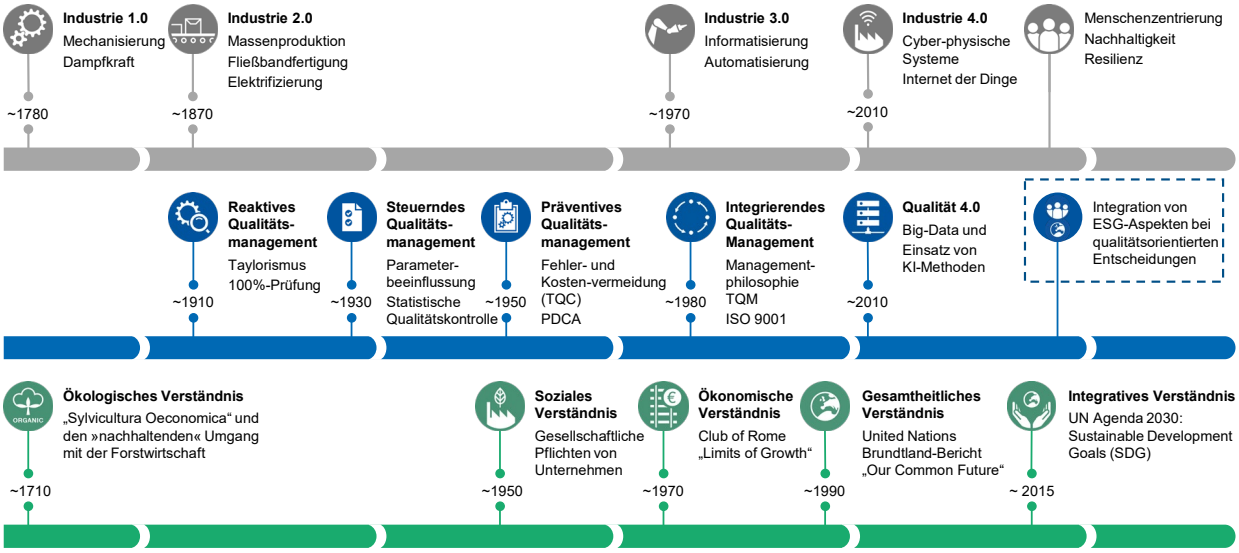


Abbildung 1: Paradigmenentwicklung aus der Perspektive produzierender Unternehmen [10]-[31]

2.2 Nachhaltigkeit als Teil des neuen Qualitätsparadigmas

Der jeweilige Verständniswandel von Qualität und Nachhaltigkeit ist offenkundig von hoher Komplexität und Dynamik geprägt [10], [20]. Aufgrund der stetig zunehmenden Bedeutung der Nachhaltigkeit für die Gesellschaft und daraus folgend für das unternehmerische Wirken, ist eine getrennte Betrachtung von Nachhaltigkeit und Qualität nicht sinnvoll. Vielmehr ergänzen sich beide Aspekte im Sinne einer ganzheitlichen, kontinuierlichen Optimierung. Dies bedeutet zwangsläufig, dass das Qualitätsverständnis vor einer Transformationsschwelle steht: Der Erweiterung des Qualitätsbewusstseins um die Perspektive der Nachhaltigkeit. Diese Forderung findet sich ebenfalls in der aktuellen Diskussion wieder. So wird für eine moderne Qualitätsdefinition beispielsweise der Anspruch an die Berücksichtigung einer gesellschaftlichen Gesamtbilanz gestellt. [31] Um dies zu verwirklichen, ist eine anforderungsgerechte Transformation zu realisieren. Dies betrifft die Organisation in seiner Gesamtheit und damit alle Facetten des Qualitätswesens.

Zur systematischen Transformation der organisatorischen Strukturen bedarf es eines geeigneten Ordnungsrahmens. Einen vielversprechenden Ansatz liefern etablierte, integrierte Managementsysteme. Insbesondere in qualitätsorientierten Unternehmen sind diese gemäß der High Level Structure der DIN EN ISO 9000 Reihe gestaltet, sodass sich gemeinsame Begriffe, Ähnlichkeiten im Text, grundlegende Definitionen und alle Anforderungen an Managementsysteme in entsprechenden Normen wiederfinden, [17]. Diese Vereinheitlichung fördert Synergien und verringert sowohl Implementierungsbarrieren als auch Redundanzen. [8] Zur Umsetzung in einem unternehmerischen Sinne wurde das Aachener Qualitätsmanagement-Modell (ACQMM) kompatibel zu den Anforderungen der DIN EN ISO 9001 entwickelt (vgl. Abbildung 2). Das Modell verfolgt das Ziel, die qualitätsbezogenen Aufgaben in einem Unternehmen aus den drei Perspektiven des Marktes, des operativen Betriebes und der Führung darzustellen. Dabei greift das lebenszyklusorientierte ACQMM die prozessorientierte Betrachtungsweise der Managementsystemnormen auf. [10]

Die hieraus hervorgehende, erweiterte Definition der unternehmerischen Qualität beschreibt diese als den „Überdeckungsgrad von Marktanforderungen (Marktperspektive), Unternehmensausrichtung (Führungsperspektive) und Unternehmensfähigkeiten (Betriebsperspektive)". [10] Marktanforderungen werden gezielt gemäß einer anforderungsgerechten Leistungserstellung adressiert und nehmen damit maßgeblichen Einfluss auf deren Gestaltung. Die Unternehmensausrichtung bildet den Rahmen des unternehmerischen Handelns durch die Definition und Vorgabe der Vision, verfolgter Strategien und daraus ableitbarer (Teil-)Ziele. Unternehmensfähigkeiten umfassen bestehende materielle und immaterielle Ressourcen zur Leistungserstellung, beispielsweise in Form von Betriebsmitteln und Knowhow.

Die angestrebte Perspektivenerweiterung berücksichtigt ein breiter werdendes Anforderungsspektrum, welches Implikationen sowohl für die Unternehmensausrichtung als auch die Ausgestaltung der Unternehmensfähigkeiten bedingt. [33] Aus Sicht der Unternehmensausrichtung sind diese innerhalb vorliegender Strategie- und Zielfindungsprozesse zu integrieren. Aus diesem Zusammenhang wird deutlich, dass eine Weiterentwicklung hin zur Nachhaltigkeitsorientierung durch die Unternehmensführung federführend angestoßen werden muss. [2] Eine durch die Führung getragene und vorgelebte Vision der nachhaltigkeits- und qualitätsorientierten Organisation bildet die notwendige Voraussetzung für die Weiterentwicklung der Unternehmensfähigkeiten in Form erweiterter Technologien und eingesetzter Ressourcen.

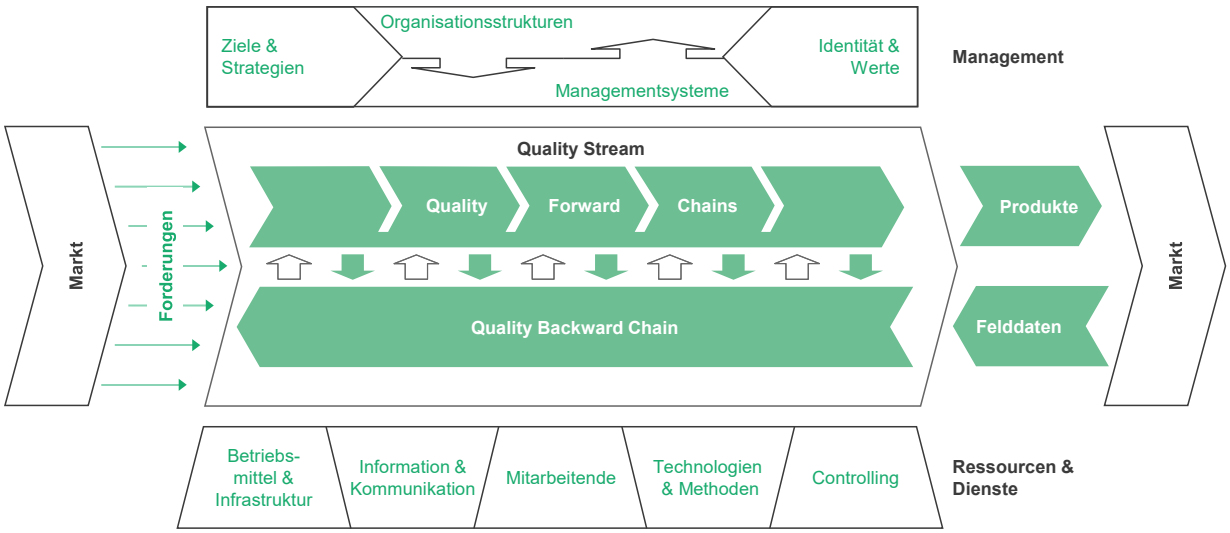


Abbildung 12: Die nachhaltige Neuausrichtung der Unternehmensaktivitäten entlang des Aachener Qualitätsmanagement-Modells [10]

Ein rein führungsorientierter Anstoß ist jedoch nicht ausreichend, um eine erfolgreiche und zielorientierte Transformation zu realisieren. Hierzu verlangt es nach erweiterten Mechanismen und insbesondere einer verantwortlichen Instanz für die Umsetzung, welche das Unternehmen zum Wandel entlang der aufgeführten Ebenen befähigt. Unter Betrachtung der vorliegenden Kompetenzen und des Wertesystems innerhalb des Unternehmenskonstrukts kann das Qualitätsmanagement die Rolle übernehmen, den organisatorischen Wandel zu einem qualitäts- und nachhaltigkeitsorientierten Unternehmen federführend zu begleiten [34]. Herauszustellen und mit hoher Dringlichkeit zu entwickeln sind in diesem Zusammenhang methodische Kompetenzen im Bereich der Datenaufnahme, -

verarbeitung und -analyse und der daraus folgenden Ableitung von Optimierungsmaßnahmen. Darüber hinaus bilden der kennzahlenorientierte, funktionsübergreifende Charakter und die damit einhergehende Interdisziplinarität die Grundlage zur Erfüllung dieser Aufgabe. Wie bereits aufgeführt, muss sich das Qualitätsmanagement selbst einer grundlegenden Evaluation bewährter Prinzipien und Mechanismen stellen. Die Einbeziehung von Aspekten der Nachhaltigkeit und die gezielte methodische wie technologische Weiterentwicklung bieten Unternehmen dabei neue Entwicklungsoptionen.

3 Analyse des Paradigmenwechsels aus den Perspektiven des Aachener Qualitätsmanagement-Modells (ACQMM)

Die Transformation entlang der drei Perspektiven des ACQMM beinhaltet mögliche Stellhebel zur Schaffung einer nachhaltigkeitsorientierten Organisation produzierender Unternehmen. Die theoretischen Ausführungen werden durch den konkreten Anwendungsfall eines Maschinen- und Anlagenbauers ergänzt, dessen Herausforderung darin besteht, aufgrund externen Drucks Transparenz hinsichtlich seines CO_2-Fußabdrucks zu schaffen und Mechanismen zur Einhaltung der neuen Vorschriften des Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (LkSG) für seine Lieferkette vorzubereiten. Als möglicher, technologiebasierter Lösungsansatz für den dargestellten Fall wird die Sigreen-Software der Siemens AG [35] dargestellt, die den Austausch von Lieferkettendaten gemäß den neuesten Vorschriften und Sicherheitsstandards ermöglicht.

3.1 Marktperspektive

Im Aachener Qualitätsverständnis ist der Markt Ausgangspunkt aller qualitätsbezogenen Aktivitäten. Der Markt wird als der Zusammenschluss „aller heterogenen, diversifizierten und temporär sich wechselnd zusammensetzenden Gruppierungen, die an einer erfolgreichen Leistungserbringung des Unternehmens interessiert sind“ verstanden. Damit umfasst der Markt nicht nur die externe Kundschaft, sondern auch unternehmensinterne Anspruchsgruppen, Zulieferer, Anteilseigner und weitere Interessenspartner. [10] Die im ACQMM beschriebene Marktperspektive kann daher als eine breitere Definition des unternehmerischen Umfelds angesehen werden, die alle Interessengruppen des Unternehmens einschließt. Die Zusammensetzung dieser Interessengruppen sorgt mitunter für widersprüchliche Forderungen an die Unternehmensleitungen.

Die Identifikation von Interessengruppen ist für die Ausrichtung des Unternehmens sinnvoll und entspricht den Anforderungen der ISO 9001 an eine Organisation. Diese verlangt, die relevanten Interessengruppen zu identifizieren und deren Anforderungen an das Managementsystem zu beschreiben. Gerade mit der Erweiterung des Betrachtungsraumes durch die Nachhaltigkeit kommen neue Interessengruppen hinzu. In der Literatur und im Expert:innengremium dieses Beitrags wurden wesentliche Interessengruppen identifiziert und diskutiert, welche direkte oder indirekte Anforderungen an die Nachhaltigkeitsausrichtung eines Unternehmens haben oder diese direkt oder indirekt beeinflussen. Dabei sind zu nennen: Arbeitsmarkt, Shareholder (Eigentümer:innen, Gesellschafter:innen und Investor:innen), Finanzmarkt, Gesellschaft, Kundschaft, Regierung und Regulierungsstellen. [7], [36]

Die wachsende Bedeutung der Nachhaltigkeit beeinflusst persönliche Entscheidungen im Berufsleben. Unternehmen, die mit nachhaltigem Wirtschaften vorangehen, haben es leichter, in einem kompetitiven Markt gut ausgebildete Arbeitskräfte für sich zu werben.

[2] Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die immer weiter steigende Bedeutung von Nachhaltigkeit für Investor:innen. Banken und Finanzmarktunternehmen legen ebenfalls vermehrt Wert auf Nachhaltigkeit in den Investitionsportfolios. Unternehmen, die von den Finanzmärkten Kapital benötigen, können durch nachhaltiges Wirtschaften langfristig die besseren Konditionen erhalten. Ein Beispiel dafür ist die EU-Verordnung zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen, die einen Rahmen für die Klassifizierung der Investitionen setzt und dadurch Transparenz auf den Finanzmärkten schafft. [37]

Vor dem Hintergrund eines erweiterten Anforderungsspektrums bietet die Analyse relevanter Normen und Richtlinien einen Ausgangspunkt für die Verifizierung der identifizierten Interessengruppen. Im Laufe der Zeit haben sich mehrere Initiativen entwickelt, die Unternehmen bei der Einführung von ESG-orientierten Systemen unterstützen und bereits eine Vielzahl an Anforderungen berücksichtigen. Diese reichen von Nachhaltigkeitsberichten über zertifizierbare Leitlinien und Managementsysteme bis hin zu gesetzlichen Regelungen. Als gesetzliche Anforderungen an die Nachhaltigkeitsberichterstattung seien das CSR-RUG, das in Kraft getretene LkSG und die CSRD-Initiative zu nennen. Darüber hinaus können zur Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9001 kompatible Richtlinien wie die DIN EN ISO 26000 für Unternehmensverantwortung [38] die DIN EN ISO 50001 für Energiemanagementsysteme [39], oder die DIN EN ISO 14001 für Umweltmanagementsysteme [40] den Aufbau integrierter Managementsysteme unterstützen. In Ähnlichkeit zum LkSG bietet die Norm SA8000 eine empfehlende Referenz der unternehmerischen Verantwortung zur Einhaltung der Menschenrechte in globalen Lieferketten [41]. Die Global Reporting Initiative (GRI) [42], der UN Global Compact [43], der ZNU-Standard [44], der Deutsche Nachhaltigkeitskodex (DNK) [45] und die Gemeinwohl-Bilanz der Gemeinwohl-Ökonomie (GWÖ) [46] stellen weitere Leitlinien für die Unternehmensberichterstattung dar, die mit den Zielen der SDGs verknüpft sind. Das Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) differenziert die Emissionen einer Lieferkette in drei Bereiche und kategorisiert die Ursachen zum Zwecke einer zielgerichteten Maßnahmenidentifikation. [47] Die aufgeführte Normen- und Berichtvielfalt verdeutlicht die Entwicklung der Anforderungen über die Zeit. Im Abgleich mit der zuvor dargelegten Auswahl lässt sich feststellen, dass sie die Anforderungen der Interessengruppen flankieren. Die nachfolgende Tabelle 1 liefert strukturierte Informationen zu ausgewählten Standards, Zertifikaten und Berichten und bietet Unternehmen somit eine erste Orientierungshilfe, welche Nachhaltigkeitsaspekte mittels welcher der identifizierten Normen und Richtlinien adressiert werden.

Integrierte Managementsysteme, die sich auf eine Reihe von Normen wie DIN EN ISO 9001, DIN EN ISO 14001, DIN EN ISO 26000 oder DIN EN ISO 50001 stützen, bieten bereits Anhaltspunkte für die Gestaltung von Strukturen, die den Nachhaltigkeitsanforderungen eines breiten Spektrums von Interessengruppen berücksichtigen. Darüber hinaus erfordert die Erfüllung der Anforderungen einen zielgerichteten Entscheidungsprozess und effizienten Mitteleinsatz. Zur Reduzierung der Komplexität des Entscheidungsproblems müssen die Anforderungen der relevanten Interessengruppen ermittelt und priorisiert werden. So kann für ein Unternehmen ein Zielkonflikt entstehen zwischen den Umweltbedürfnissen der Kundschaft und der Gesellschaft, den Sicherheitsanforderungen der Mitarbeitenden, den regulatorischen Anforderungen der Regierung und den finanziellen Bedürfnissen seiner Gesellschafter.

Tabelle 1: Übersicht über ausgewählte Normen, Zertifikate und Berichte im Bereich Nachhal keit und die adressierten Interessengruppen [17], [38]–[47]

	Art / (Zertifikat oder Logo vorhanden)	Aspekte	Adressierte Interessens-gruppen	Anforderungen	Umfang	Kombinier-barkeit
ISO 14001: Umwelt-management-systeme	Zertifizierbarer Standard für Umwelt-management-systeme (Ja)	Ökol.	G, R	8 Themenblöcke, Dokumentation und Indikatornachweis (Umweltkennzahlen)	Jährliche Überwachungsaudits, Re-Zertifizierung alle 3 Jahre	ISO 9001, ISO 50001
ISO 26000: Leitfaden zur gesell-schaftlichen Verantwortung	Leitfaden zur unternehmerischen Verantwortung (nein)	Ökol. Ökon. Soz.	EGI, F, G, K, R	7 Kernthemen mit 7 Prinzipien	Freiwillige Anwendung des Leitfadens	
ISO 50001: Energie-management-systeme	Zertifizierbarer Standard für Energie-management-systeme (Ja)	Ökon.	EGI, RE	8 Themenblöcke, Dokumentation und Indikatornachweis (Energieleistungs-kennzahlen)	Jährliche Überwachungsaudits, Re-Zertifizierung alle 3 Jahre	ISO 9001, ISO 14001
SA 8000: Social Accountability International	Zertifizierbarer Standard für Arbeits-bedingungen (Ja)	Soz.	AM, G, R, RE	8 Themenblöcke, Dokumentation	Halbjährliche Überwachungsaudits, Re-Zertifizierung alle 3 Jahre	ISO 9001, ISO 14001
GRI: Global Reporting Initiative	Berichtsstandard (Ja)	Ökol. Ökon. Soz.	AM, EGI, F, G, K, R, RE	3 Bereiche mit in Summe 86 Indikatoren (Dokumentation und Indikatornachweise, je nach Branche unterschiedlich)	Festlegung eines gleichbleibenden Berichtszyklus durch Organisation (i.d.R. jährlich).	DNK, ZNU
UN Global Compact	Selbstverpflichtung und rudimentärer Berichtsstandard (Ja)	Ökol. Soz.	AM, G, EGI	6 Themenblöcke in Fragebogen, Erklärung der Geschäftsführung	Beitrittsantrag, anschließend jährlich Fragebogen und Erklärung der Geschäftsführung	
ZNU-Standard	Standard zum Aufbau eines integrierten Management-systems (Ja)	Ökol. Ökon. Soz.	G	32 Themenblöcke, Dokumentation und Indikatornachweise (Umwelt- und Energiekennzahlen)	Jährliche Überwachungsaudits, Re-Zertifizierung alle 3 Jahre	ISO 9001, ISO 14001, ISO 50001, SA 8000, GRI, DNK
DNK: Deutscher Nachhaltigkeits-kodex	Berichtsstandard (Ja)	Ökol. Ökon. Soz.	AM, G	20 Themenblöcke, Dokumentation, Indikatornachweise (Nichtfinanzielle Leistungsindikatoren)	Jährliche Berichterstattung	GRI, CSR-RUG, ZNU
GWÖ: Gemeinwohl-Ökonomie	Gemeinwohlbilanz und Transparenz-standard (Ja)	Ökol. Ökon. Soz.	EGI, F, RE	20 Themenblöcke, Dokumentation	Intensive Beteiligung	
Greenhouse Gas Protocol	Treibhausgas-Emissionen Berechnungs-standard (nein)	Ökol	AM, F, K	18 Aspekte von Treibhausgas Emissionen über 3 Scopes	Freiwillige Anwendung des Standards	

Aspekte: Ökol. = Ökologie; Ökon. = Ökonomie; Soz. = Soziales

Interessensgruppen: AM = Arbeitsmarkt & Mitarbeitende; EGI = Eigentümer, Gesellschafter & Investoren (Shareholder); F = Finanzmarkt; G = Gesellschaft; K = Kundschaft; R = Regierung; RE = Regulierungsstellen

Zur Bewertung der Anforderungen der Interessengruppen kann ein Klassifizierungsansatz zu Rate gezogen werden, der sich an das *Kano*-Modell zur Bewertung der Qualitätsanforderungen eines Produkts anlehnt. Anhand des *Kano*-Modells werden Produktmerkmale eingeteilt in erstens *Basismerkmale*, die erfüllt werden müssen, um überhaupt eine Marktakzeptanz zu erzielen, zweitens *Leistungsmerkmale*, die explizit vom Markt gefordert sind und primär dem Produktvergleich dienen, und drittens *Begeisterungsmerkmale*, die nicht offensichtlich vom Markt formuliert werden, jedoch bei Erfüllung den größten Einfluss auf die Zufriedenheit nehmen können. [10] Daran angelehnt kann eine simplifizierte Skala *muss, soll, kann* abgeleitet werden, um die Nachhaltigkeitsanforderungen der Marktperspektive zu klassifizieren. Die *muss*-Ebene stellt Mindestanforderungen an das Unternehmen als Voraussetzung für das Agieren in einer Marktwirtschaft, wie z.B.

die Erfüllung gesetzlicher Anforderungen und die Interessen der Shareholder. Die *soll*-Ebene stellt Anforderungen an das Unternehmen, um die Wirtschaftslage und Profitabilität zu sichern, wie beispielsweise die Erfüllung von Kundenanforderungen und Normen. Schließlich führt die Erfüllung von Anforderungen der *kann*-Ebene dazu, dass Unternehmen als verantwortungsvoll handelnd wahrgenommen werden. Die Anforderungen werden von den Interessengruppen nicht ausdrücklich erwartet und können wachstumstreibend sein. Das Kano-Modell berücksichtigt weiterhin eine zeitliche Dimension. *Begeisterungsmerkmale* werden über die Zeit zu *Leistungs*- und schließlich zu *Basismerkmalen*. [10] In dem Expert:innengremium zu diesem Beitrag wurde die Hypothese formuliert, dass dies auch für die Zukunft der Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Unternehmen gelten wird. Mit Gesetzen wie dem CSR-RUG und dem LkSG wurden bereits erste länger bestehende Anforderungen (*kann*- / *soll*-Anforderungen) nachhaltigen Wirtschaftens in Gesetze (*muss*-Anforderung) überführt [4], [5]. Analog zu dem Kano-Modell besagt die Hypothese nicht, dass jegliche *kann*-Anforderungen mit der Zeit in *soll*- bzw. *muss*-Anforderungen übergehen, sondern dass ein zeitliches Prinzip im Allgemeinen zu Grunde liegt. Der vorgeschlagene Klassifizierungsansatz für Anforderungen der Interessengruppen aus der Markperspektive ist in Abbildung 3 dargestellt.

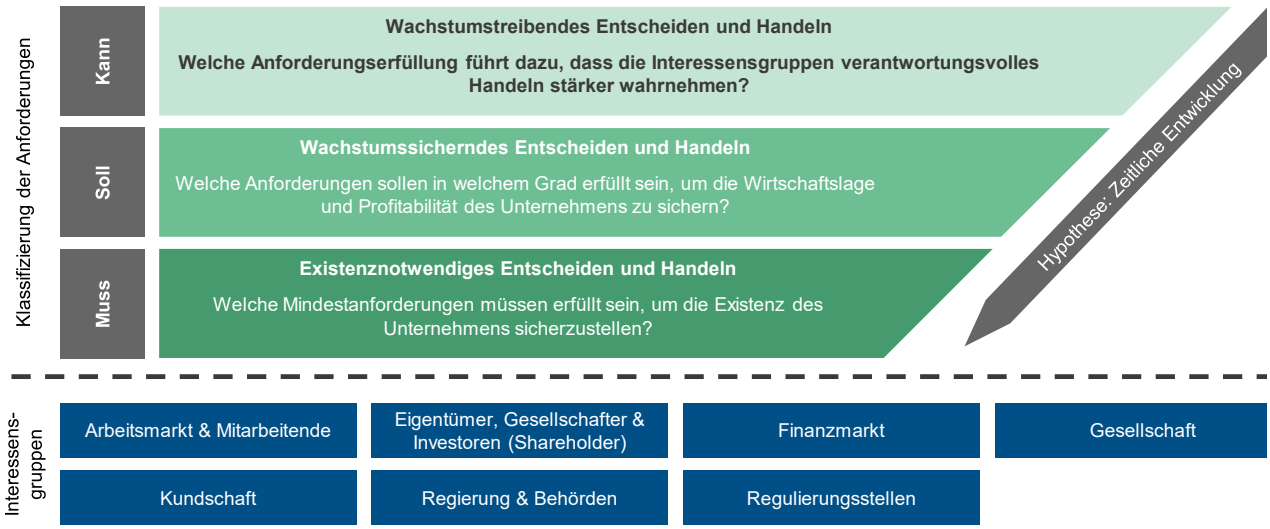


Abbildung 3: Klassifizierungsansatz für Anforderungen aus der Marktperspektive

Durch teils gegenläufige Anforderungen der Interessengruppen an das Unternehmen ist eine, im ACQMM beschriebene, Führungsperspektive notwendig, welche eine Priorisierung der Interessengruppen und somit ihrer Anforderungen durch die Unternehmensführung vorsieht.

3.2 Führungsperspektive

Im Sinne des Qualitätsmanagements fokussiert die Führungsperspektive die Systemqualität eines Unternehmens, um unternehmerische Leistungen, die den Anforderungen der Interessengruppen entsprechen, zu erbringen [10]. Die qualitätsorientierten Strukturen und die zugrundeliegenden Managementsysteme stellen hierfür ein wesentliches Gestaltungsfeld dar. Die Nachhaltigkeitsanforderungen haben somit einen Einfluss auf die Qualitätspolitik und -ziele des Unternehmens. Um sicherzustellen, dass ESG-bezogene Aktivitäten effektiv und effizient gesteuert werden, müssen diese in den strategischen Ent-

scheidungs- und Zielsetzungsprozessen der Führungsebene eines Unternehmens eingebettet werden. Zur zentralen Aufgabe der Unternehmensführung, welche nach wie vor der Initiator und Treiber von Qualitätsinitiativen ist, gehören die Definition und das Vorleben der Werte des Unternehmens. Die Formulierung von Strategien leitet sich als eine wesentliche Aufgabe aus dem Ziel der Unternehmung ab, um eine erfolgreiche Berücksichtigung von Marktforderungen zur Erstellung begeisternder Produkte und Dienstleistungen sicherzustellen. Dabei geht es nicht nur um die Aufrechterhaltung des aktuellen Status des Unternehmens, sondern auch um die Sicherung seiner zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit. [10] Für die Bewertung der Systemqualität eines Unternehmens ist ein neues Qualitätsverständnis erforderlich, das der veränderten Qualitätsperspektive der Interessengruppen gerecht wird.

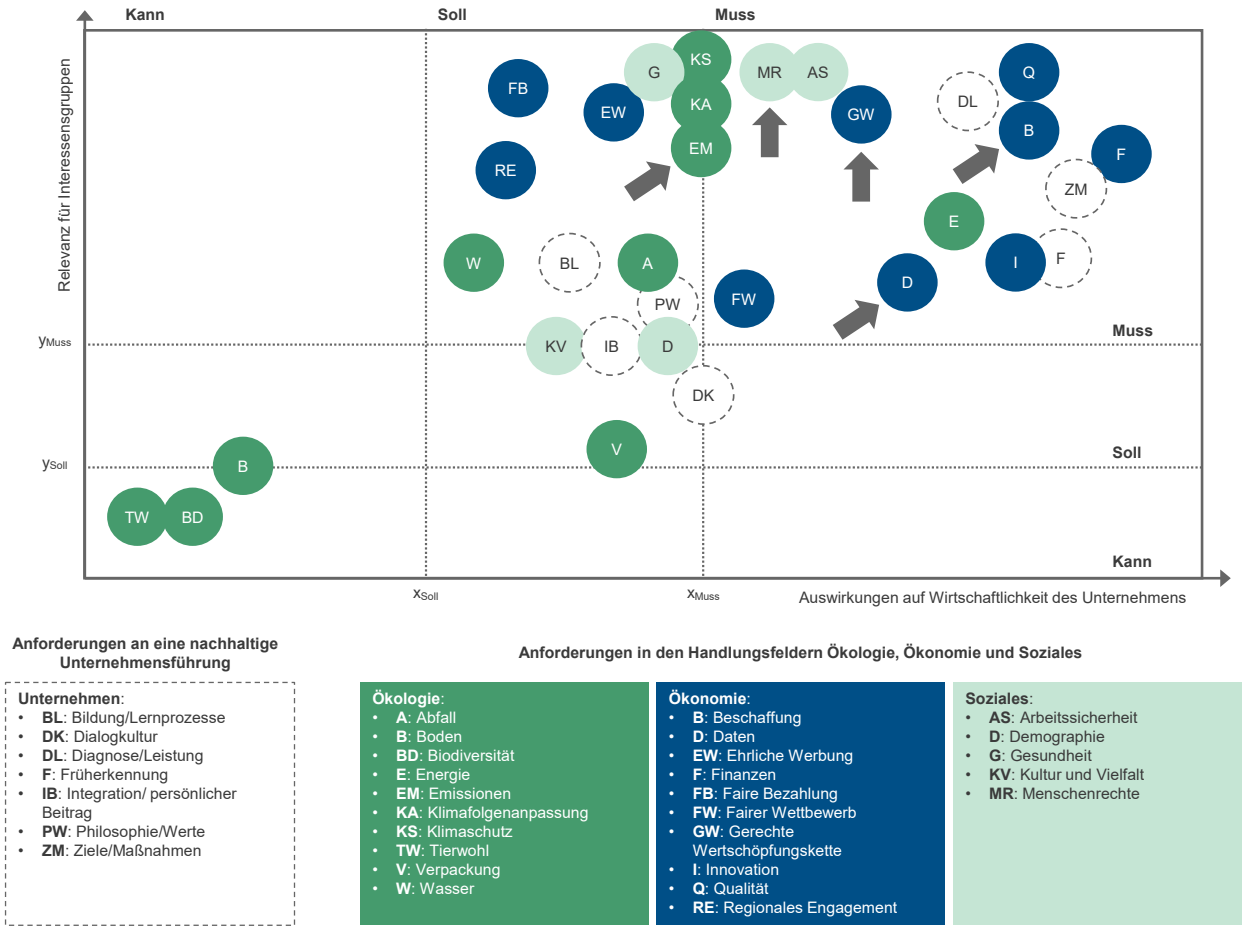


Abbildung 4: Wesentlichkeitsmatrix mit exemplarischer Positionierung von Handlungsfeldern auf der Grundlage des ZNU-Standards [44]

Basierend auf der bereits genannten, normativen Qualitätsdefinition nach DIN EN ISO 9000 bedeutet die Erfüllung der Anforderungen der Interessengruppen eine Erweiterung um die kombinierten ESG-Kriterien. Um das Wirtschaftlichkeitsprinzip von Unternehmen einzubeziehen, lassen sich diese Anforderungen nach dem Erfüllungsgrad klassifizieren, der den wirtschaftlichen Wachstumserfolg des Unternehmens sichert. Um zu bestimmen, welche Anforderungen priorisiert werden sollen, kann eine Wesentlichkeitsanalyse herangezogen werden. Die Analyse stützt sich auf das Konzept der doppelten Wesentlichkeit, wie es in den Vorschlägen für die CRSD-Richtlinie dargelegt ist. Dazu zählen die

Auswirkungen von Nachhaltigkeitsaspekten auf das Geschäftsergebnis, die Geschäftslage und den Geschäftsverlauf („Outside-in-Perspektive“). Andererseits die Auswirkungen der Geschäftstätigkeit auf Menschen und Umwelt („Inside-out-Perspektive). [6] Dabei werden die unternehmensrelevanten Anforderungen entlang zweier Achsen positioniert: Die Auswirkungen auf die Geschäftstätigkeit des Unternehmens als Abszisse und die Relevanz für die Interessengruppen als Ordinate. Die in Abbildung 4 dargestellte Matrix basiert auf den Anforderungen des ZNU-Standards des Zentrums für Nachhaltige Unternehmensführung der Universität Witten/Herdecke. Der ZNU-Standard ist ein praxisorientierter und zertifizierbarer Standard für nachhaltiges Management mit dem Ziel, Nachhaltigkeit für Unternehmen greifbar und messbar zu machen. Der Standard bezieht eine Vielzahl von Normen und Richtlinien mit ein und stellt Anforderungen an die Unternehmensführung in Hinblick auf spezifische Themenschwerpunkte der drei Nachhaltigkeitsdimensionen. Eine Wesentlichkeitsmatrix kann im Rahmen des ZNU-Standards als Nachweis für die systematische Erfassung der Handlungsfelder in den Bereichen Umwelt, Wirtschaft und Soziales Verwendung finden. [45] Die Matrix-Achsen sind auf der Grundlage des in Kapitel 3.1 vorgestellten Klassifizierungsmodells für Anforderungen der Interessengruppen unterteilt, sodass sie qualitativ die Bereiche *muss*, *soll* und *kann* innerhalb der Wesentlichkeitsmatrix abbilden.

Im dargestellten Beispiel hat das Unternehmen die jeweiligen Anforderungen über die verschiedenen ESG-Kategorien hinweg qualitativ abgebildet und innerhalb der Matrix verortet. Die Pfeile zeigen die Prioritätenentwicklungen der Anforderungen innerhalb der Matrix an. Der Kreis "Gerechte Wertschöpfungskette (GW)" befindet sich beispielsweise im Muss-Quadranten und hat mit dem erlassenen LkSG aus Sicht der Akteure an Relevanz gewonnen. Nach dem LkSG und den daraus hervorgehenden Anforderungen ist das Unternehmen als Zulieferer direkt und indirekt verpflichtet, die menschenrechtlichen und umweltbezogenen Sorgfaltspflichten in seiner Lieferkette zu beachten. In diesem Zusammenhang muss eine Risikoanalyse sowohl im eigenen Geschäftsbereich als auch bei direkten Zulieferern durchgeführt werden. Geeignete Präventivmaßnahmen, einschließlich Beschaffungsstrategien, müssen festgelegt werden, um diese Risiken zu verhindern oder zu minimieren. Zudem muss das Unternehmen jährlich einen Bericht vorlegen. [5] Für den Nachweis müssen für die Risikoanalyse und Berichterstattung notwendige Daten erhoben werden. Für die Fortführung von Lieferverträgen verlangt die Kundschaft zudem den Nachweis über den aggregierten CO_2-Fußabdruck der gelieferten Produktsegmente (Engl. Product Carbon Footprint – PCF). Somit weisen Emissionen, Beschaffung und Daten eine erhöhte Relevanz sowohl für die Interessengruppen als auch für die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens auf.

Gemäß der erfolgten Einstufung in der Wesentlichkeitsmatrix werden die dargelegten Anforderungen im unternehmerischen Zielbildungs- und damit im Entscheidungsprozess hinsichtlich der Ressourcenallokation höher gewichtet. Dabei entwickelt sich das Verständnis von Systemqualität im dargestellten Beispiel von der Gestaltung von Lieferketten, die die Leistungsanforderungen der Kundschaft im Sinne des klassischen Qualitätsverständnisses erfüllen, hin zu einer Lieferkette, die die Anforderungen einer breiteren Interessengruppe entspricht. Gleichzeitig werden zusätzliche Kundenanforderungen in Bezug auf gerechte Wertschöpfungsketten und die Einhaltung von Vorschriften im Sinne des ESG-Spektrums berücksichtigt.

Aus der Neugewichtung zu berücksichtigender Anforderungen ergeben sich erweiterte Herausforderungen an die Adaption unternehmensinterner Mechanismen und Prozesse. Ein wesentlicher Aspekt besteht im Hinblick auf das oben dargelegte Beispiel in der De-

finition und Verfolgung erweiterter Kennzahlen. Dies setzt erhöhte Ansprüche an die zielgerichtete Generierung und Verwertung von Daten. Eine Anpassung des Zielsystems führt damit unweigerlich zu Entwicklungsbedarfen der Unternehmensfähigkeiten. Dies sei im Rahmen der Betriebsperspektive betrachtet.

3.3 Betriebsperspektive

Die Betriebsperspektive stellt den operative Gestaltungsrahmen zur Erbringung unternehmerischer Leistungen dar. [10] Mögliche Gestaltungsfelder sind die Etablierung von Qualitätsregelkreisen und die Bereitstellung, Steuerung und effiziente Nutzung benötigter Ressourcen. Eine verstärkte Berücksichtigung der ESG-Kriterien betrifft das Management von Technologien und Methoden sowie die Einbeziehung und Schulung von Mitarbeitenden in den genannten Bereichen. Dies hat wiederum bedeutende Auswirkungen auf die Qualitätsplanung, -sicherung, -lenkung und -verbesserung. Insbesondere die Wechselwirkungen zwischen ökologischer Nachhaltigkeit und dem Qualitätsverständnis und -management entlang des Produktlebenszyklus stehen im Fokus. Im Sinne der ökologischen Effektivität als nachhaltigkeitsorientierte Produktionsstrategie werden geschlossene Nutzungskreisläufe von Ressourcen anstelle einer linearen Ressourcennutzung angestrebt. [48] Als Ansatz der Umsetzung können unterschiedliche „R-Strategien“ dienen. Diese umfassen unter anderem „Reuse“ als Produktwiederverwendung, „Refurbishment“ als die Aufarbeitung des Produkts und „Remanufacturing“ als den Prozess der Demontage und der Komponentenverwertung. [49] Diese R-Strategien erfordern eine Anpassung der Definition von Qualitätsanforderungen für Produkte und Prozesse., die von der Qualitätsplanung bis zur Definition geeigneter Qualitätssicherungsmaßnahmen und der Zusammenarbeit mit Zulieferern im Rahmen der Qualitätslenkung reichen [50]. Aus einer Prozessperspektive ist die Vermeidung von Verschwendung durch das Prinzip des Lean Management bereits verankert [36]. Mögliche Kenngrößen beziehen sich je nach Industriezweig unter anderem auf Emissionsmengen, Energie-, Wasser- und Materialverbrauch sowie Abfall und Produktionsausschuss. [42] Die ökologische Effizienz sowie der Ausweis der zugehörigen Kenngrößen gelten zunehmend als wesentliche Voraussetzung für die Qualitätsgüte eines Prozesses.

Abbildung 5 zeigt ein am WZL der RWTH Aachen entwickeltes Kennzahlensystem zur Input-Output-basierten Nachhaltigkeitsbewertung von Produktionsprozessen. Aufgeteilt in die 19 dargestellten Nachhaltigkeitsfaktoren der Dimensionen Ökologie, Soziales und Ökonomie liegen dem Modell insgesamt 107 Nachhaltigkeitskennzahlen zugrunde (Ökologie: 32; Soziales: 31; Ökonomisch: 44). Bei der Herleitung dieser Kennzahlen wurden 615 Messgrößen in einer Literaturrecherche identifiziert und über eine Cluster- und Wesentlichkeitsanalyse verdichtet. Das Modell kann zur strukturierten Messung der Nachhaltigkeitsleistung von Produktionssystemen genutzt werden. Dadurch können auf Managementebene frühzeitig Optimierungspotenziale und Fehlentwicklungen identifiziert und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. [51]

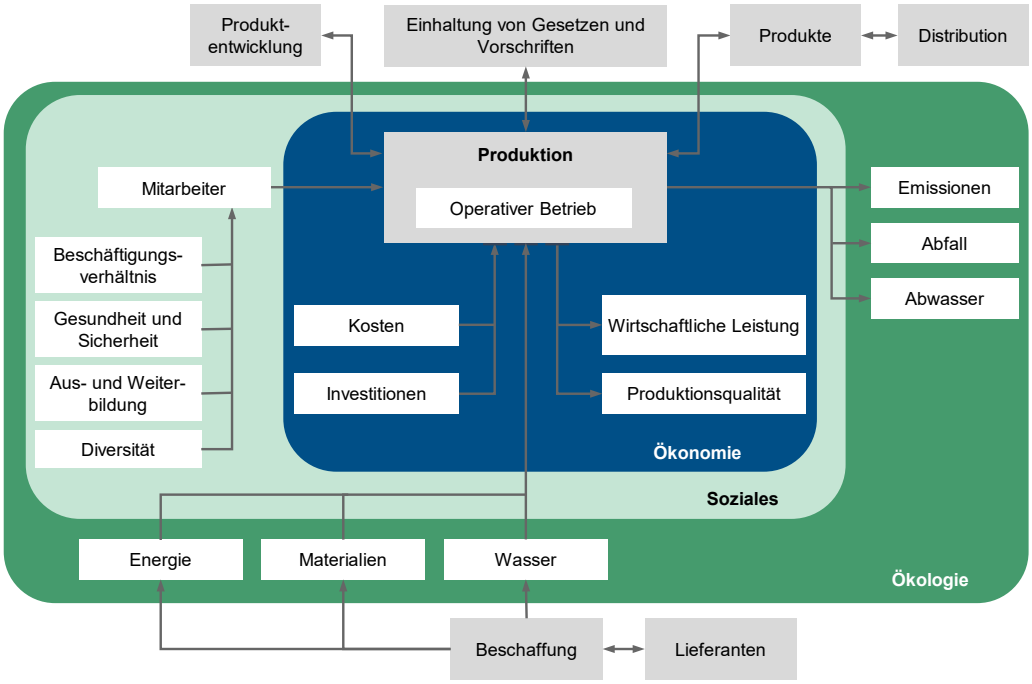


Abbildung 5: Input - Output basiertes KPI-Modell zur Nachhaltigkeitsbewertung [51]

Die Ableitung verlässlicher Kennzahlen zur Steuerung und Regelung von nachhaltigkeitsinitiativen verlangt den Einschluss vielfältiger Informationen. Hierdurch steigt der Bedarf nach geeigneten Strukturen zur Generierung, Verwaltung und Nutzung von Daten. Trotz bereits initiierter Digitalisierungsbestrebungen lässt sich dies weiterhin als Herausforderung für Unternehmen charakterisieren. Das Datenmanagement bildet die Grundlage für den effizienten Einsatz fortgeschrittener Analysemethoden, da durch dieses ein bedeutender Einfluss auf die resultierenden Ergebnisse und Interpretationen genommen wird. [52] Daten sind also wertvolle Ressourcen, deren Wert sich aus der Datenqualität ableitet. Ein mit der Unternehmensdatenarchitektur harmonisiertes Datenmanagement im Sinne einer wertschöpfungskettenübergreifenden Betrachtung stellt einen Wettbewerbs- und Qualitätsfaktor dar. [53]

Die Erweiterung bestehender Datenmanagementsysteme erfordert die gezielte Identifikation, Erfassung und die Integration unterschiedlicher, gegebenenfalls neuer Datenquellen im Sinne einer erweiterten Wissensbasis. Ausgehend von der Schaffung eines Verständnisses über relevante Datenquellen und Erfassungssysteme werden Anforderungen an die Datenaufbereitung sowie deren Bereitstellung definiert. In diesem Zusammenhang sind die unterschiedlichen Dimensionen der Datenqualität (beispielsweise Datenmenge, -struktur, und -vollständigkeit) zwingend zu berücksichtigen [54]. Unterstützt wird dies durch die Auswahl und den Aufbau einer geeigneten digitalen Infrastruktur. Als wesentliche Prinzipien sind in diesem Zusammenhang unter anderem Redundanzfreiheit und aufwandsarme Erfassung (Prozessbezug), Mechanismen der Systempflege und klare Verantwortlichkeiten (Systembezug) sowie Rückverfolgbarkeit und Analysefähigkeit (Datenbezug) zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind Systeme so zu gestalten, dass auch im Falle von dezentral gespeicherten Daten ein zentralisierter Zugriffspunkt zur Datenabfrage besteht und eine Einbindung Dritter ermöglicht wird (beispielsweise durch externe Anwendungen). [53], [55] Die geschaffene Datenbasis ermöglicht den Einsatz erweiterter Analyseverfahren und damit der Ableitung einer datenbasierten Entscheidungsfindung im Sinne der kontinuierlichen Verbesserung. Für die Umsetzung von Qualitätsverbesserungsmaßnahmen im Unternehmen kann auf bestehende Mechanismen und

Methoden des Qualitätsmanagements zurückgegriffen werden. Im Gegensatz zur bereits etablierten Vorgehensweise werden ESG-Kriterien zu Optimierungszielen oder einzuhaltenden Nebenbedingungen und damit ausdrücklich in die Definition von Zielerreichung und Projektqualität einbezogen.

Während für das dargestellte Unternehmensbeispiel die Risikoanalyse und die Berichterstattung des LkSG eine Verantwortung im Unternehmen vergeben werden kann, erfordern die Berechnung des PCF und der Aufbau der notwendigen Dateninfrastruktur und -basis eine Projektstruktur. Hier können klassische Ansätze und Methoden des Lean Managements nach dem PDCA- oder DMAIC-Zyklus in einem funktionsübergreifenden Team angewandt werden. Dabei kann eine Funktion des Nachhaltigkeitsmanagements eine koordinierende Rolle im Projekt übernehmen. Nach der Zieldefinition können bewährte Methoden wie Makigami, Wertstromanalyse oder Gemba Walks herangezogen werden, um mögliche Stellhebel zu identifizieren und Anforderungen und Projektrahmen detailliert festzulegen. Die Anforderungen an die Daten, von der notwendigen Infrastruktur über die Schnittstellen bis hin zu den Integrations- und Analysekonzepten werden unter gezielter Berücksichtigung der adressierten ESG-Kriterien definiert. In diesem Zusammenhang können weitere Qualitätskriterien für Daten hinsichtlich eines bestimmten Zwecks interpretiert werden, wie beispielsweise die Vertrauenswürdigkeit und Sicherheitsstandards der Daten für die Berechnung des PCF. Bekannte Kontrollkonzepte, wie beispielsweise Audits, werden weiterhin zur Überprüfung der umgesetzten Maßnahmen eingesetzt. Die nachhaltige Verankerung der Maßnahmen wird durch Schulungen und Vorzeigebeispiele erreicht. Hierbei wird den Kompetenzen sowie der Einstellung der Mitarbeitenden zur Nachhaltigkeit eine hohe Bedeutung für den Erfolg von Nachhaltigkeitsprojekten zugesprochen.

Für die weitere Betrachtung des Praxisbeispiels wird die Berechnung eines PCF entlang der Lieferkette herangezogen. Diese ist aufgrund einer ungenügenden Datengrundlage oft nur auf Basis statischer Annahmen und Abschätzungen möglich. Um jedoch präzise und belastbar Optimierungspotenziale ableiten zu können, müssen die Beteiligten der Lieferkette Up- und Downstream eine gemeinsame, verlässliche Datenbasis schaffen, auf welcher die PCF-Berechnungen begründet werden. Hieraus lässt sich der steigende Bedarf der Vernetzung entlang der Lieferkette ableiten. Eine Herausforderung bzgl. der Offenlegung von Emissionsdaten besteht darin, dass durch diese auf sensible Unternehmensdaten wie Produktionsprozesse zurückgeschlossen werden kann. Eine unmittelbare Weitergabe wird demnach nicht ohne angemessene Sicherheitsmaßnahmen erfolgen. Die Weitergabe der Emissionsdaten ist nur dann gesichert, wenn Unternehmen eine Verschlüsselung der Kommunikation und die verbleibende Hoheit über die eigenen Daten garantiert wird. Es wird deutlich, dass eine lieferkettenübergreifende Kommunikationsplattform benötigt wird, die diese Anforderungen erfüllt. Abbildung 6 zeigt schematisch, wie die Kommunikations- und Materialflüsse einer solchen Lieferkette gestaltet werden können. Jedes Unternehmen kommuniziert direkt und verschlüsselt mit einer zentralen

Plattform. Hierdurch wird sichergestellt, dass jede Partei die Berechnungsergebnisse nutzen kann, dabei jedoch keinen Zugriff auf individuelle Daten anderer Partner hat.

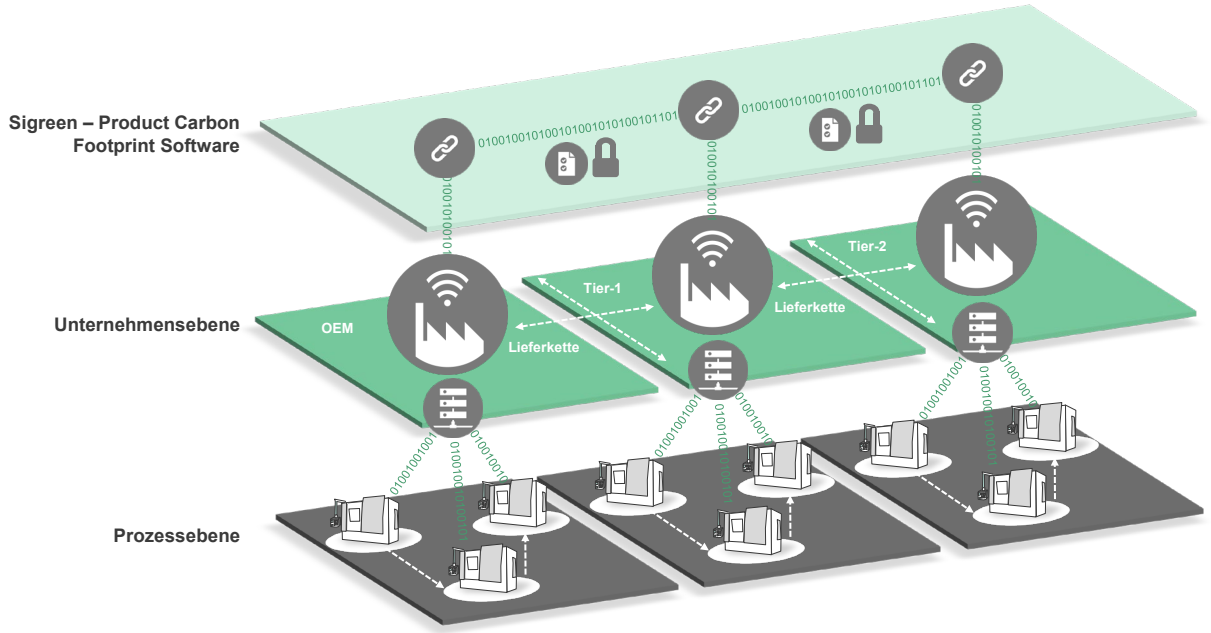


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Kommunikation von Emissionsdaten anhand von Sigreen zur Berechnung des PCF entlang einer Lieferkette

Für das dargelegte Schema wurde bereits eine entsprechende Softwarelösung von der Siemens AG entwickelt. Die Sigreen zugrundeliegende Technologie TSX (Trustworthy Supply Chain Exchange) schafft durch Datenverschlüsselung eine vertrauenswürdige Datengrundlage zur Berechnung dynamischer PCF. [35] Der Austausch der Daten kann hierbei beispielsweise über Schnittstellen wie API oder Connect erfolgen. Mitglieder der Lieferkette sehen nur die Endberechnung und behalten die Kontrolle über sensible Produktionsdaten. Dieses Vertrauen ermöglicht erst die präzise Berechnung der Emissionen und somit die gemeinsame Dekarbonisierung der Lieferkette. Die Software inkludiert verschiedene Standards, um auch bei unterschiedlichen Berechnungsmethoden belastbare Ergebnisse zu erzielen.

Um die Dekarbonisierung der Lieferketten zu unterstützen, hat die Siemens AG das Netzwerk ESTAINIUM mitgegründet [56]. Das Netzwerk zeichnet sich als Zusammenschluss aus Hochschulen, Zertifizierern und Unternehmen unterschiedlicher Größe aus. Ziel des Vereins ist es, den Austausch zwischen den Mitgliedern zum Themenfeld Dekarbonisierung in der Industrie zu fördern.

Weiterhin wird angestrebt, die Vielzahl existierender Standards (vgl. Kapitel 3.1) zu konsolidieren und in Kooperation mit Nachhaltigkeitsvordenkern aus verschiedenen Branchen, Nichtregierungsorganisationen und Zertifizierern zukunftsrelevante Themenfelder zu definieren.

4 Implikationen für die qualitätsorientierte Leistungsentwicklung und -erbringung

Viele Initiativen und Forderungen nach kreislaufwirtschaftlichen Produkten und Dienstleistungen lassen sich nur dann wirtschaftlich wie auch nachhaltig umsetzen, wenn die

eigenen Unternehmensstrukturen und -prozesse eine entsprechende effektive und effiziente Auslegung aufweisen. Langfristig impliziert dies einen geschlossenen Kreis zwischen den Marktanforderungen und der Leistungserbringung des Unternehmens. Auf diese Weise werden die Anforderungen schrittweise erfüllt und prägen langfristig das Qualitätsverständnis und die Qualitätserwartungen von Seiten der Marktperspektive, beispielsweise hinsichtlich eines verantwortungsvollen Ressourceneinsatzes. Dies kann jedoch nicht nur durch eine unternehmensseitige Reaktion auf Anforderungen des Marktes erfolgen, sondern auch durch dessen aktive Gestaltung auf Basis des Leistungsangebots. Durch die gezielte Einführung nachhaltiger Leistungen können der Kundschaft und weiteren Anspruchsgruppen neue Wege aufgezeigt werden und ein erweitertes Verständnis der Qualität unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit initiiert werden. Dies betrifft jedoch nicht lediglich die Ausgestaltung des Produktes, sondern ebenfalls die mit dessen Erstellung verbundenen Aspekte. So zeigte das Unternehmensbeispiel, dass die Transparenz von Prozessen entlang der Lieferkette sowie die Vertrauenswürdigkeit und die Sicherheitsstandards der herangezogenen Daten neue Aspekte der Prozessqualität darstellen. Die aktive Gestaltung des Nachhaltigkeitsverständnisses durch die Antizipation von Anforderungen kann als Definition von neuen Qualitätsstandards dienen, die das Qualitätsverständnis langfristig beeinflussen. So wird die Entwicklung des Paradigmas aus der Perspektive des Spannungsfeldes zwischen Marktperspektive und Unternehmen zu einem Zusammenspiel von *Market Pull* und *Market Push* im Kontext der Nachhaltigkeitsinitiativen.

Darüber hinaus stellen die Betriebsperspektive und die damit verbundenen Gestaltungsfelder der Qualitätsplanung, -sicherung, -lenkung und -verbesserung eine wesentliche Rolle für die taktisch-operativen Aktivitäten des Qualitätsmanagements dar, die sich langfristig in der Systemqualität des Unternehmens niederschlagen. Festzuhalten ist, dass sich die Kernaktivitäten der Qualitätsfacetten nicht grundlegend ändern. Lediglich die zugrundeliegende Optimierungsrichtung, abgeleitet aus den Zielen und Kriterien der Qualitätspolitik, steht eine umfassende Transformation bevor. So fließen ESG- und Kreislaufwirtschaftskriterien in die Definition der Qualitätsanforderungen und Quality Gates bereits in die Produktentwicklung und die Auslegung der Prozesse ein. Dies ist besonders relevant für die Festlegung von Qualitätskriterien für Produktionsprozesse, die recycelte, wiederaufbereitete oder aufgearbeitet Komponenten verwenden. Des Weiteren wird die Reaktionsfähigkeit auf knappe Ressourcen und eine Umgestaltung der Produkt- und Produktionsstrategie zu einer R-Strategie eine wichtige Rolle für die Qualitätsplanung spielen. Aufgrund der verkürzten Produktlebenszyklen erfordert dies eine enge Abstimmung mit anderen Abteilungen sowie mit Zulieferern und dem Absatzmarkt. Dies wirkt sich sowohl auf die Bestimmung von Qualitätsstandards als auch die Erwartungen an die bereitgestellten Leistungen aus.

Eine wirtschaftlich vertretbare Gestaltung der genannten Strategien kann nur erreicht werden, wenn ESG-Kriterien in den vom Qualitätsmanagement koordinierten betrieblichen Elementen verankert werden: Prozesse, Kompetenzen, Ressourcen, Kommunikation, betriebliche Planung und Steuerung, Anforderungen, Kennzahlen, Datenmanagement und -lenkung.

Ausgehend von der Entwicklung von Normen, Standards und Zertifikaten werden branchenweite Datenstandards benötigt, um Interoperabilität zu ermöglichen. Es bedarf eines Ökosystems für die Entwicklung neuer Initiativen und Qualitätsstandards, welches den technologischen Fortschritt zur Stärkung der Nachhaltigkeit - “Empower Green Production” - proaktiv und vorausschauend vorantreiben.

Die Einbeziehung von ESG-Kriterien in die Qualitätsverbesserung bedeutet deren explizite Berücksichtigung innerhalb der Zielfunktion bzw. der Nebenbedingungen zur Ableitung von Optimierungsmaßnahmen. Mittels der dargelegten Weiterentwicklung des Qualitätsmanagements schließt sich der Qualitätsregelkreis zur erweiterten Berücksichtigung der Interessengruppen an Unternehmen. Die Weiterentwicklung in den verschiedenen Funktionen des Qualitätsmanagements ist in Abbildung 7 zusammengefasst. Diese bilden in ihrer Gesamtheit das neue Qualitätsparadigma.

Aus der Analyse entlang der Betrachtungsperspektiven des ACQMM wird deutlich, dass ESG-Initiativen von der Unternehmensführung vorangetrieben und innerhalb der Strategie- und Zielfindungsprozesse berücksichtigt werden müssen. Die systematische und prozessorientierte Implementierung dieser Ziele auf die Betriebsperspektive erfordert keine grundlegende Umgestaltung der bestehenden Mechanismen und Methoden, sondern vielmehr eine Neudefinition bzw. Erweiterung des bestehenden Qualitätsverständnisses und der Qualitätsbewertung.

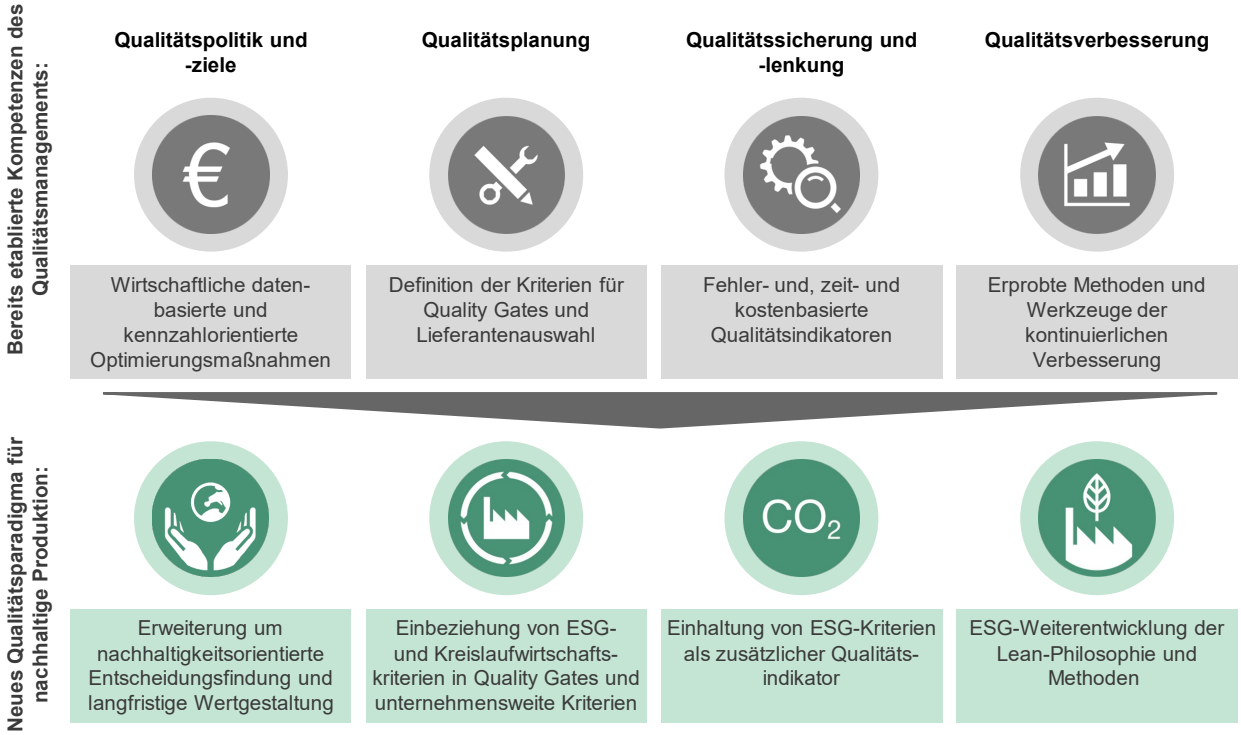


Abbildung 7: Aspekte des Paradigmenwechsels für die Qualität in der nachhaltigen Produk-tion

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Einordnung der historischen Entwicklung der Wirtschafts-, Produktions-, Qualitätsmanagement- und Nachhaltigkeitsströmungen kündigen den nun anstehenden Paradigmenwechsel an. Das Aachener Qualitätsmanagementmodell ACQMM bietet bereits einen Ordnungsrahmen für die Gestaltung von qualitätsorientierten Aktivitäten und kann zur Analyse der Stellhebel für unternehmensinterne Veränderungen herangezogen werden. Zugrunde liegen drei Perspektiven der Gestaltungsoptionen eines Unternehmens: Die Marktperspektive, die Führungsperspektive sowie die Betriebsperspektive. Für das

Verständnis der Marktperspektive werden die Interessengruppen und deren Anforderungen, die ein Unternehmen berücksichtigen muss, analysiert. Für die Analyse der Anforderungen kann eine Wesentlichkeitsmatrix verwendet werden, die nach dem Konzept der doppelten Wesentlichkeit sowohl die Auswirkungen von Nachhaltigkeitsaspekten auf die Geschäftstätigkeit des Unternehmens als auch die Relevanz für die Interessengruppen aufzeigt. In Anlehnung an das *Kano*-Modell ist das hier vorgestellte Analysewerkzeug, das auf Nachhaltigkeitsanforderungen des ZNU-Standards basiert, in *muss*-, *soll*- und *kann*-Anforderungen unterteilt. Darüber hinaus wird eine zeitliche Entwicklung von *kann*- bis *muss*-Anforderungen angenommen, indem beispielsweise Initiativen in verschiedenen Richtlinien, Normen und Gesetzen institutionalisiert werden.

Die Bewertung der Anforderungen aus der Marktperspektive wird von der Unternehmensführung in Ziele und Entscheidungen überführt. Die operative Umsetzung der gesetzten Qualitätsziele beeinflusst die Gestaltung der Prozessqualität im Unternehmen. Dies betrifft insbesondere die Definition und das Verständnis von Qualitätskriterien in den Funktionen Qualitätsplanung, -sicherung, -lenkung und -verbesserung. Die klassischen Methoden und Werkzeuge aus dem Qualitätsmanagement zu Optimierungszwecken können nach dem Prinzip des Lean Managements mit einem verstärkten ESG-Fokus angepasst und erweitert werden. Hierbei entstehen Wechselwirkungen zwischen den Anforderungen des Produktentstehungsprozess im Hinblick auf ökologische Nachhaltigkeit und der Gestaltung von Qualitätsanforderungen und -aktivitäten. Als Beispiel können hier die R-Strategien wie „Reuse“, „Refurbishment“ und „Remanufacturing“ genannt werden.

Zur zielgerichteten Anwendung der aufgezeigten Maßnahmen sind geeigneten Strukturen zur Generierung, Verwaltung und Nutzung von relevanten Daten zu schaffen. Um diese Erweiterung der Regelkreise in der Betriebsperspektive zu beherrschen, muss ein zukunftsfähiges Datenmanagementsystem bestehende Datenstrukturen integrieren und neue und erweiterbar gestaltet werden. Die Bedeutung der Daten wurde am Beispiel des Austauschs und der Berichterstattung von PCF-Daten anhand der Lösung Sigreen der Siemens AG beschrieben. Dabei werden die zielgerichtete Gestaltung von Datensystemen sowie die Datentreue als weitere ESG-bezogene Qualitätskriterien in der System- und Prozessqualität eines Unternehmens bewertet. Es wird davon ausgegangen, dass diese Qualitätsdimensionen Voraussetzungen und Erfolgsfaktoren für die erfolgreiche Umsetzung von unternehmensübergreifenden Nachhaltigkeitsinitiativen sind.

Zum einen können Analysen, die bereits in nachhaltigkeitsorientierte Standards und gesetzliche Vorgaben eingebettet sind, eine effektive und effiziente Interpretation der Stakeholder-Anforderungen und eine konsequente Umsetzung in Ziele und Entscheidungen unterstützen. Sowohl die Gestaltung nachhaltigkeitsorientierter Managementsysteme als auch die operative Umsetzung von Initiativen werden durch bereits bestehende Systeme, Methoden und Werkzeuge des Qualitätsmanagements unterstützt. Hier ist eine nachhaltigkeitsorientierte Definition der Anforderungen an die Systeme, Qualitätsfunktionen und Methoden erforderlich. Schließlich bilden Daten in einer zunehmend produktivitätsorientierten Wirtschaft die Grundlage und den Schlüsselfaktor für die Ermöglichung unternehmensinterner und -externer Nachhaltigkeitsinitiativen. Diese beinhalten jedoch nicht nur, wie im klassischen Qualitätsmanagement, Informationen über ein Produkt und die Prozesse, die zu seiner Herstellung durchlaufen werden. Vielmehr werden zukünftig Informationen darüber, wo sich ein Produkt und in welchem Zustand es sich aufgrund seiner Bedingungen im Use-Zyklus befindet, entscheidend werden, um eine Lebenszyklusverlängerung durch Wertsteigerung zu erreichen oder eine höhere Varianz der eingesetzten Stoffe im (erneuten) Produktionszyklus beherrschbar zu machen.

Die Integration des Paradigmas der Nachhaltigkeit in das unternehmerische Qualitätsverständnis bietet somit die Möglichkeit für weitere Untersuchungsansätze. Für ein umfassendes Verständnis der Marktperspektive sollten die Wechselwirkungen zwischen den Interessengruppen mit Bezug auf die Nachhaltigkeit detailliert untersucht werden. So kann ein Werkzeug-Set für die Nachhaltigkeitsoptimierung entwickelt werden. Außerdem ist zu überprüfen, welche der Methoden und Modelle sich für verschiedene Anwendungsfälle eignen. Anforderungen an das beschriebene integrierte Datenmanagementsystem sind ebenfalls detaillierter zu betrachten. Die Effizienzpotenziale der Prozessdigitalisierung für die Produktion, könnten durch die Analyse konsistenter Daten ebenfalls die Nachhaltigkeitsperspektive adressieren. Aus Sicht des Qualitätsmanagements bekommt der Erkenntnisgewinn, die Aufklärung produktionstechnischer oder anwendungsseitiger Aspekte, eine höhere Bedeutung. Die Transparenz und der aufklärende Charakter des neuen Qualitätsparadigmas im Hinblick auf Notwendigkeit zur Berücksichtigung der Nachhaltigkeit motivieren eine neue Definition des Qualitätsmanagements. Die Erfassung, Auswertung und Verdichtung von Daten zu Wissen und die Verknüpfung mit nachhaltigkeitsorientierten Wirkmodellen zu Handlungsoptionen befördern den Wandel vom *Quality Management* zur *Quality Intelligence*.

Nachhaltigkeitsorientierte Transformationen stellen Unternehmen vor die Herausforderung, Gewinnerzielung und Nachhaltigkeitsanforderungen in Einklang zu bringen. Die Umsetzung von Nachhaltigkeitsaspekten zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen ist mit einem hohen technischen und organisatorischen Aufwand verbunden. Im Hinblick auf die langfristige Etablierung dieser gesetzlichen Anforderung wird das Qualitätsmanagement eine wichtige Rolle für eine effiziente Umsetzung spielen. Ein Umdenken in Bezug auf Nachhaltigkeit und Qualität sowohl auf der Ebene der Mitarbeiter als Befähiger in der Leistungserbringung als auch auf der Ebene der Verbraucher als Leistungsempfänger wird erforderlich sein. Die Transformation des Qualitätsmanagements kann eines der innovativen Konzepte sein, um Nachhaltigkeitsinitiativen im Unternehmen für eine kosteneffiziente Produktion zu ermöglichen. Dies gilt insbesondere für die erwähnten R-Strategien und nachhaltigkeitsorientierte Datenmanagementsysteme für die Produktion. Hier kann die angewandte Forschung in Kooperation mit Unternehmen noch zur Erprobung neuer Konzepte genutzt werden. Die Förderung von Ökosystemen zur Erprobung und Validierung dieser Konzepte ist ein notwendiger Schritt. Als Beispiel sei hier der Verein ESTAINIUM genannt. Dieser kann nicht nur zur Weiterentwicklung von technischen Lösungen beitragen, sondern auch zur Weiterentwicklung von Standards und Schnittstellen, die eine unternehmensübergreifende Interoperabilität ermöglichen. Denn ebenfalls die Neuorientierung des Qualitätsverständnisses muss sich am Grad der Nützlichkeit, neue nachhaltigkeitsorientierte Geschäftsmodelle für produzierende Unternehmen zu entwickeln und einzuführen, messen lassen.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter Deutschlands Excellence Strategie – EXC-2023 Internet of Production – 390621612.

6 Literatur

[1] A. Krämer und T. Burgartz, *Kundenwertzentriertes Management: Value-To-Value - Pricing - Big Data - Controlling*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2022.

[2] O. Eisele, *Nachhaltigkeitsmanagement - Handbuch für die Unternehmenspraxis: Gestaltung und Umsetzung von Nachhaltigkeit in kleinen und mittleren Betrieben* (ifaa-Edition). ifaa - Institut für angewandte Arbeitswissenschaft, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021.

[3] A. Watjer. „Pariser Klimaabkommen." bpb.de. https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/das-europalexikon/309438/pariser-klimaabkommen/ (Zugriff am: 12. Jan. 2023).

[4] „Gesetz zur Stärkung der nichtfinanziellen Berichterstattung der Unternehmen in ihren Lage- und Konzernlageberichten (CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz)*," *Bundesgesetzblatt*, Jg. 2017, Teil 1 Nr. 20, S. 802–814, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmj.de/SharedDocs/Gesetzgebungsverfahren/Dokumente/BGBl_CSR-RiLi_UmsetzungsG.pdf?__blob=publicationFile&v=3

[5] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. „Das Lieferkettengesetz: Menschenrechte schützen." bmz.de. https://www.bmz.de/de/themen/lieferkettengesetz/ (Zugriff am: 12. Jan. 2023).

[6] Europäische Kommission. „Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2013/34/EU, 2004/109/EG und 2006/43/EG und der Verordnung (EU) Nr. 537/2014 hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen." eur.lex.europa.de. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021PC0189&from=EN (Zugriff am: 14. Feb. 2023).

[7] E. Glanze, M. Nüttgens und W. Ritzrau, „Unternehmenserfolg durch Nachhaltigkeit – Reifegrad- und Vorgehensmodell zum Aufbau eines datenbasierten Nachhaltigkeitsmanagements," *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, Jg. 58, Nr. 1, S. 155–166, 2021, doi: 10.1365/s40702-020-00694-9.

[8] M. Englert, „Road to Excellence: Potenzial des Sustainable Management im 21. Jahrhundert," in *Nachhaltiges Management: Nachhaltigkeit als exzellenten Managementansatz entwickeln*, M. Englert und A. Ternès, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2019, S. 3–22.

[9] Accenture. „Accenture Umfrage: Fast die Hälfte der deutschen Verbraucher würde für nachhaltig gestaltete Produkte tiefer in die Tasche greifen." newsroom.accenture.de. https://newsroom.accenture.de/de/news/accenture-umfrage-fast-die-h%C3%A4lfte-der-deutschen-verbraucher-w%C3%BCrde-f%C3%BCr-nachhaltig-gestaltete-produkte-tiefer-in-die-tasche-greifen.tekpdf (Zugriff am: 24. Jan. 2023).

[10] R. Schmitt und T. Pfeifer, *Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken,* 5. Aufl. München, Wien: Hanser, 2015.

[11] S. Hilbert, „Nachhaltigkeitscontrolling," in *Nachhaltiges Management: Nachhaltigkeit als exzellenten Managementansatz entwickeln*, M. Englert und A. Ternès, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2019, S. 521–559.

[12] O. F. R. Haardt, *Industrielle Revolution 4.0: Eine historische Navigationshilfe,* Darmstadt: wbg Paperback, 2022.

[13] H.-D. Zollondz, *Grundlagen Qualitätsmanagement: Einführung in Geschichte, Begriffe, Systeme und Konzepte* (Edition Management)*,* 3. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2011.

[14] B. Sommerhoff, „Die Entwicklung des Qualitätsmanagements im 20. und 21. Jahrhundert," in *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*, T. Pfeifer und R. Schmitt, Hg., 7. Aufl. München: Hanser, 2021, S. 15–37.

[15] T. Hummel und C. Malorny, „Total Quality Management (TQM)," in *Handbuch QM-Methoden: Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen*, G. F. Kamiske, Hg., 3. Aufl. München: Hanser, 2015, S. 1-48.

[16] S. Koch, *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen: Six Sigma, Kaizen und TQM*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.

[17] *DIN EN ISO 9000:2015-11, Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015*, 9000:2015-11, DIN Deutsches Institut für Normung e. V, Berlin, 2015.

[18] „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0," H. Kagermann, W. Wahlster und J. Helbig, Frankfurt/Main, 2013. Zugriff am: 24. Jan. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.acatech.de/publikation/umsetzungsempfehlungen-fuer-das-zukunftsprojekt-industrie-4-0-abschlussbericht-des-arbeitskreises-industrie-4-0/download-pdf/?lang=de

[19] B. Tropschuh, F. Dillinger, S. Korder, M. Maier, Q. Gärtner und S. Vernim, „Industrie 5.0 – ein menschzentrierter Ansatz: Ansätze zur flexiblen und menschzentrierten Einbindung und Unterstützung der Mitarbeitenden in der digitalisierten und vernetzten Produktion der Zukunft," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 116, Nr. 6, S. 387–392, 2021.

[20] F. M. Zimmermann, „Was ist Nachhaltigkeit - eine Perspektivenfrage?," in *Nachhaltigkeit wofür?: Von Chancen und Herausforderungen für eine nachhaltige Zukunft*, F. M. Zimmermann, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2016, S. 1–24.

[21] H. C. von Carlowitz, *Sylvicultura Oeconomica, Oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung Zur Wilden Baum-Zucht*. Leipzig: Braun, 1713.

[22] A. B. Carroll, „Corporate Social Responsibility: Evolution of a Definitional Construct," *Business & Society*, Jg. 38, Nr. 3, S. 268–295, 1999, doi: 10.1177/000765039903800303.

[23] H. R. Bowen, *Social Responsibilities of the Businessman*. Iowa City: University of Iowa Press, 1953.

[24] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers und W. W. Behrens III, *The Limits to growth: A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind,* 2. Aufl. New York: Universe books, 1972.

[25] I. Pufé, *Nachhaltigkeitsmanagement* (Pocket-Power 63). München: Hanser, 2012.

[26] H. Kromp-Kolb, „Klimakrise und die Folgen für Wirtschaft und Gesellschaft," in *CSR und Klimawandel: Unternehmenspotenziale und Chancen einer nachhaltigen und klimaschonenden Wirtschaftstransformation* (Management-Reihe Corporate Social Responsibility), A. Sihn-Weber und F. Fischler, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2020, S. 21–39.

[27] "Our Common Future," World Commission on Environment and Development, 1987. Zugriff am: 27. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf

[28] M. Billio, M. Costola, I. Hristova, C. Latino und L. Pelizzon, „Inside the ESG ratings: (Dis)agreement and performance," *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, Jg. 28, Nr. 5, S. 1426–1445, 2021, doi: 10.1002/csr.2177.

[29] „Who Cares Wins: Connecting Financial Markets to a Changing World: Recommendations by the financial industry to better integrate environmental, social and governance issues in analysis, asset management and securities brokerage," ABN Amro *et al.*, 2004. Zugriff am: 27. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.unepfi.org/fileadmin/events/2004/stocks/who_cares_wins_global_compact_2004.pdf

[30] „Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 25. September 2015: Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung," Generalversammlung der Vereinten Nationen, 2015. Zugriff am: 23. Jan. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf

[31] F. Leregger, „Digitalisierung und Klimawandel im Kontext der Sustainable Development Goals," in *CSR und Klimawandel: Unternehmenspotenziale und Chancen einer nachhaltigen und klimaschonenden Wirtschaftstransformation* (Management-Reihe Corporate Social Responsibility), A. Sihn-Weber und F. Fischler, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2020, S. 149–162.

[32] Global Footprint Network. „Last year, earth overshoot day fell on july 28." overshootday.org. https://www.overshootday.org/ (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

[33] B. Hinrichs, *Nachhaltigkeit als Unternehmensstrategie: Roadmap für nachhaltiges Wirtschaften & Innovation.* Freiburg: Haufe, 2021.

[34] C. Kuei und M. H. Lu, „Integrating quality management principles into sustainability management," *Total Quality Management & Business Excellence*, Jg. 24, Nr. 1-2, S. 62–78, 2013, doi: 10.1080/14783363.2012.669536.

[35] Siemens AG. „Dekarbonisierung beginnt mit Daten: Mit SiGREEN den CO2-Fußabdruck Ihrer Produkte gezielt optimieren." siemens.com. https://www.siemens.com/de/de/unternehmen/themenfelder/product-carbon-footprint.html (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

[36] D. Reichert, C. Cito und I. Barjasic, *Lean & Green: Best Practice: Wie sich Ressourceneffizienz in der Industrie steigern lässt*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2018.

[37] „Verordnung (EU) 2020/852 des eurpäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088*"*, Europäische Union, Brüssel, 2020. Zugriff am: 27. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852&from=EN

[38] *DIN EN ISO 26000:2021-04, Leitfaden zur gesellschaftlichen Verantwortung (ISO 26000:2010); Deutsche Fassung EN ISO 26000:2020*, 26000:2021-04, DIN Deutsches Institut für Normung e. V, Berlin, 2021.

[39] *DIN EN ISO 50001:2018-12, Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 50001:2018); Deutsche Fassung EN ISO 50001:2018*, 50001:2018-12, DIN Deutsches Institut für Normung e. V, Berlin, 2018.

[40] *DIN EN ISO 14001:2015-11, Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 14001:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14001:2015*, 14001:2015-11, DIN Deutsches Institut für Normung e. V, Berlin, 2015.

[41] Social Accountability International. „SA8000® Standard." sa-intl.org. https://sa-intl.org/programs/sa8000/ (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

[42] Global Reporting Initiative. „Deutsche Übersetzungen: Die globalen Standards für die Nachhaltigkeitsberichterstattung.“ globalreporting.org. https://www.globalreporting.org/how-to-use-the-gri-standards/gri-standards-german-translations/ (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

[43] „Global Compact Strategy: 2021-2023,“ United Nations Global Compact, New York, 2021. Zugriff am: 4. Jan. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://ungc-communications-assets.s3.amazonaws.com/docs/about_the_gc/UN-GLOBAL-COMPACT-STRATEGY-2021-2023.pdf

[44] ZNU-Standard Nachhaltiger Wirtschaften. „Zentrum für Nachhaltige Unternehmensführung.” znu-standard.com. https://www.znu-standard.com/ (Zugriff am: 14. Feb. 2023).

[45] „Leitfaden zum Deutschen Nachhaltigkeitskodex: Orientierungshilfe für Einsteiger,“ Rat für Nachhaltige Entwicklung, 2020. Zugriff am: 4. Jan. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.deutscher-nachhaltigkeitskodex.de/de-DE/Documents/PDFs/Sustainability-Code/Leitfaden-zum-Deutschen-Nachhaltigkeitskodex.aspx

[46] Gemeinwohl-Ökonomie Deutschland. „Neue Werte für die Wirtschaft: Willkommen bei der Gemeinwohl-Ökonomie Deutschland!” germany.ecogood.org. https://germany.ecogood.org/ (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

[47] Greenhouse Gas Protocol. „Standards.” ghgprotocol.org. https://ghgprotocol.org/standards (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

[48] J. H. Becker, „Cradle to Cradle als neue Philosophie der nachhaltigen Produktentwicklung,“ in *Praxishandbuch Nachhaltige Produktentwicklung: Ein Leitfaden mit Tipps zur Entwicklung und Vermarktung nachhaltiger Produkte*, U. Scholz, S. Pastoors, J. H. Becker, D. Hofmann und R. van Dun, Hg., Berlin: Springer Gabler, 2018, S. 31-38.

[49] Ellen MacArthur Foundation, „Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition: Vol 1,” 2013. Accessed: Feb. 27, 2023. [Online]. Available: https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an

[50] M. Padrón, S. Beckschulte, J. Haller, J. Elsner und R. H. Schmitt, „Nachhaltigkeit im Produktionsanlauf: Potenziale für ein ressourceneffizientes Management der Anlaufphasen eines Produktionssystems,“ *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 118, Nr. 1-2, S. 15–19, 2023, doi: 10.1515/zwf-2023-1014.

[51] F. Sohnius, M. Iglauer, L. Gussen und R. H. Schmitt, „Quantification of sustainability in production systems through a conceptual input-output model,“ in *Proceedings of the 16th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, CIRP ICME ‘22,* in Veröffentlichung.

[52] S. Beckschulte, L. Huebser, R. Günther und R. H. Schmitt, „Datengetriebenes Fehlermanagement in der Produktion: Komplexe Zusammenhänge zwischen Datenerfassung und -analyse im Fehlermanagement erfolgreich erschließen und nutzen,“ *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 118, Nr. 4, S. 192-197, 2023, doi: 10.1515/zwf-2023-1050.

[53] R. Guenther, S. Beckschulte, M. Wende, H. Mende und R. H. Schmitt, „AI-Based Failure Management: Value Chain Approach in Commercial Vehicle Industry,“ *Procedia CIRP*, Jg. 109, S. 251–256, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.05.245.

[54] B. Otto, „The Evolution of Data Spaces,“ in *Designing Data Spaces: The Ecosystem Approach to Competitive Advantage*, B. Otto, M. ten Hompel und S. Wrobel, Hg., Cham: Springer, 2022, S. 3–15.

[55] R. Günther, M. Wende, S. Baumann, F. Bartels, S. Beckschulte, G. H. Korn und R. H. Schmitt, „Data Enabled Failure Management Process (DEFMP) across the Product Value Chain,” in *Conference on Production Systems and Logistics: International Conference, CPSL 2023, hosted at the Tecnológico de Monterrey (Tec de Monterrey), Querétaro, Mexico: 28th February 2023 – 2nd March 2023: Proceedings*, D. Herberger, M. Hübner und V. Stich, Hg., 2023, S. 459-468, doi: 10.15488/13464.

[56] Estainium Association. „ESTAINIUM Association.” estainium.eco. https://www.estainium.eco/de/ (Zugriff am: 27. Feb. 2023).

Die Inhalte für den Vortrag 4.3 erarbeiteten die Autor:innen mit weiteren Expert:innen in dieser Arbeitsgruppe:

Daniel Buschmann, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Robin Günther, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Annika Hauptvogel, Siemens AG, München
Dr. Ina Heine, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Philipp Jatzkowski, TÜV Rheinland Consulting GmbH, Köln
Julian Keens, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Frank Lesmeister, Bain & Company, Inc., München
Yvonne T. Mertens, ONIQ GmbH, Köln
Marcos Padrón, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Fernando Quito, Liebherr GmbH, Kirchdorf/Iller
Dr.-Ing. Johanna Rauchenberger, Güdel Group AG, Langenthal
Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen
Felix Sohnius, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Sebastian Stinner, DX FACTURE GmbH, Aachen
Ronja Trappmann, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Podiumsdiskussion 01

Data value to empower sustainability

Die Podiumsdiskussion beleuchtet die Bedeutung von Daten und deren Wert für eine nachhaltige Produktion. Die Diskussion wird sich auf die Vernetzung und Zusammenarbeit von Unternehmen entlang des gesamten Lebenszyklus konzentrieren.

Data value to

Die grüne Produktion fördert die Resilienz unserer Wertschöpfungsketten und fordert einen unternehmens- und domänenübergreifenden Ansatz. Dazu bedarf es der frischen Ideen der gemeinnützigen Forschungseinrichtungen, um neue Methoden und Technologien zu erfinden und so zu entwickeln, dass sie den Spagat zwischen dem Schutz der Unternehmensinteressen und dem Nutzen von Daten über Unternehmensgrenzen hinweg ermöglichen.

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt

Director of the Chair of Production Metrology and Quality Management, WZL | RWTH Aachen University and Director, Fraunhofer IPT

Host

Netto-Null bis 2040 ist ein zentrales Element der Ericsson Strategie. Mit 5G durchbrechen wir gemeinsam mit unseren Kunden die Energiekurve und implementieren nachhaltige, effiziente Anwendungsfälle.

Joe Willke

Head of Center of Excellence 5G Industry 4.0, Ericsson GmbH

Co-Host

Wir können nur erfolgreich agieren, wenn wir bestehende Systemgrenzen erweitern und unternehmensübergreifende Kollaborationsmodelle bei gleichzeitiger Sicherung des unternehmensinternen Know-hows etablieren.

Dr.-Ing. Jan Kantelberg

R&D Manager Lead Architecture,
Vaillant Group

Für die anstehende industrielle Transformation, bspw. die Etablierung einer europäischen Produktion von Energiespeichern wie Lithium-Ionen-Batterien, ist es erforderlich, das Innovationspotenzial der gesamten Zuliefererkette, insbesondere des Mittelstandes, mit einzubeziehen. Digitale Methoden können dabei helfen, unternehmensübergreifend neue, energie- und ressourcenschonende Lösungen zu erarbeiten.

Dr.-Ing. Stephan Witt

COO,
Jagenberg Group

Wir brauchen mehr Datenflüsse und nicht Datenseen.

Dr. Arno Zinke

Senior Vice President Software Engineering,
Hexagon AB

Co-Host

empower sustainability

Podiumsdiskussion 02

User stories in circular production

In der Podiumsdiskussion wird erörtert, welchen Beitrag User Stories als digitale Produktakte zu einer profitablen Kreislaufproduktion leisten können. Im Mittelpunkt der Diskussion steht die Frage, ob systemisch konzipierte User Stories von KMUs überhaupt umgesetzt werden können – oder ob dies ein exklusives Instrument für Global Player bleibt.

Wir müssen aufhören Nachhaltigkeit zu kurz zu denken – die wirkliche „Double-Digit Beute“ werden wir erst machen, wenn wir es durch die Circular Production schaffen, eine Gleichrichtung der ökologischen und ökonomischen Ziele im Wertschöpfungssystem zu erreichen!

Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Günther Schuh

Director of the Chair of Production Engineering,
WZL | RWTH Aachen University and Director, Fraunhofer IPT

Host

Digitalisierung ist der wichtigste Hebel, um Zirkularität erfolgreich umzusetzen – von Design und Produktion über einen nachhaltigen Betrieb bis zum Recycling.

Dr. Annika Hauptvogel

Head of Technology and Innovation Management,
Siemens AG

Co-Host

User stories

Wir haben bereits heute alle Werkzeuge für eine grünere Produktion. Um unseren Beitrag zu leisten, brauchen wir ein konsequent nachhaltiges denken und handeln. Wir alle sind gefordert.

Dr.-Ing. Philipp Jatzkowski

Head of Quality and Metrology Consulting,
Testo Industrial Services GmbH

Wir brauchen Transparenz und Wissenstransfer in der Lieferkette, um gemeinsam über Firmengrenzen hinweg Vertrauen zu entwickeln. Im Ergebnis zeigt sich Nachhaltigkeit in effizientester Ressourcennutzung, die auch wirtschaftlich erfolgreich ist. Dafür ist das Zusammenwirken von technischer Fachexpertise und Wissenschaft elementar.

Jens Gerhard

Head of Technology & Process Development,
Feintool System Parts Jena GmbH

Die zirkuläre Produktion wird eine noch stärkere, digitale Vernetzung über Unternehmensgrenzen hinweg erfordern.
Als Europa müssen wir daher dringend an unserer digitalen Souveränität arbeiten, um die Abhängigkeit im Bereich kritischer, digitaler Infrastruktur zu reduzieren. Andernfalls laufen wir Gefahr, dass demnächst „as a service“ konzipierte Produktionsanlagen per Knopfdruck stillgelegt werden können.

Dr.-Ing. Tilman Buchner

Partner & Director - Global Leader Innovation Center
for Operations, The Boston Consulting Group

in circular production

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.dnb.de abrufbar.

Robert H. Schmitt, Thomas Bergs, Christian Brecher, Günther Schuh (Hrsg.):

Empower Green Production
31. AWK

© 2023 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT und WZL | RWTH Aachen University

Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium AWK
c/o RWTH Aachen University
Steinbachstraße 25
52074 Aachen
Telefon +49 241 80-27404
Fax +49 241 80 22287
info@awk-aachen.de
www.awk-aachen.de

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Steinbachstraße 17
52074 Aachen
Telefon +49 241 8904-0
info@ipt.fraunhofer.de
www.ipt.fraunhofer.de

WZL | RWTH Aachen University
Campus-Boulevard 30
52074 Aachen
Telefon +49 241 80-20283
info@wzl.rwth-aachen.de
www.wzl.rwth-aachen.de

© Titelbild: chana/stock.adobe.com
Weitere Mitwirkende: Hanna Brings, Lea Kaven, Pascal Kienast, Susanne Krause, Heidi Peters, Michèle Robrecht, Christina Ruschitzka

Creative Commons Lizenzvertrag
Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de)

doi: 10.24406/publica-939

Zu diesem Buch

„Empower Green Production“– dies ist das Leitthema des 31. AWK, das vom 11. bis 12. Mai 2023 in vier parallelen Vortragsreihen mit insgesamt zwölf Fach- und Keynotevorträgen sowie acht Plenarvorträgen aus Wissenschaft und Praxis Wege zu einer wertschöpfenden Kreislaufwirtschaft weist.

Der vorliegende Tagungsband beschreibt anhand zahlreicher konkreter Beispiele aus aktuellen Industrie- und Forschungsprojekten, welche Technologien und Strategien diese Transformation fördern werden, wie Unternehmen aus der Fülle an Methoden ihre individuellen Werkzeuge für den Wandel auswählen, und bei welchen Herausforderungen die angewandte Produktionsforschung gezielt unterstützen kann. Die vier zentralen Themenblöcke des AWK umfassen Beiträge zu leistungsfähigen und resilienten Dateninfrastrukturen, zu Modellbildung und Analysen mit dem Ziel einer ressourcenschonenderen Fertigung, zu Szenarien und Geschäftsmodellen für eine nachhaltige Wertschöpfung sowie zu Technologien und Prozessen für eine wertsteigernde Kreislaufwirtschaft.

Dieses Buch fasst die erarbeiteten Vortragsinhalte zusammen und stellt sie der wissenschaftlichen Community und dem interessierten Fachpublikum im Rahmen einer Open-Access-Veröffentlichung bereit. Seine Einzelbeiträge wurden von den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des WZL | RWTH Aachen University und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT gemeinsam mit namhaften Expertinnen und Experten sowie Referentinnen und Referenten aus Industrie, Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zusammengestellt und ausgearbeitet.

Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium AWK
c/o RWTH Aachen University
Campus-Boulevard 30
52074 Aachen
Telefon +49 241 80 27400
Fax +49 241 80 22293
info@awk-aachen.de
www.awk-aachen.de