

2.2 Biologische Transformation in der Produktion

C. Brecher, A. Broos, B. Essig, B. Hofmann, G. Mallmann, T. Muecke, M. Queins, M. Streichfuss, A. Tavakolian, D. Zontar

Gliederung

1	Einleitung und Motivation	139
2	Systematik der Biologisierung	140
3	Übergeordnete Anwendungsfälle in der biologischen Transformation	143
3.1	Kreislaufwirtschaft	143
3.2	Vielfalt in der Produktion	147
3.3	Konvergenz Mensch Maschine	150
4	Blick in die Zukunft	153

Kurzfassung

Biologische Transformation in der Produktion

Die Ressourcenknappheit und der Klimawandel zwingen die Produktionstechnik über ihre klassische Wertschöpfung nachzudenken. Die biologische Transformation setzt an dieser Stelle an. Sie nutzt die Natur als Vorbild und kann daher als nächster notwendiger Technologiesprung nicht nur in Richtung nachhaltige, sondern auch resiliente Produktion gesehen werden. Durch die Verschmelzung von Technik, Bio- sowie Informationstechnologie wird ein biointelligentes System geschaffen, das das Herzstück der biologischen Transformation ausmachen wird. Die Produktion von Morgen wird wie das natürliche Ökosystem autonom und ohne zentrale Steuerung auf Änderungen reagieren, ihre Stoffe und Energien möglichst lange und sinnvoll nutzen sowie menschliche Bedürfnisse berücksichtigen. Für eine erfolgreiche Umsetzung ist ein interdisziplinärer Wissenstransfer zwingend notwendig. Zudem stehen Politik und Wirtschaft in der Verantwortung, eine Akzeptanz innerhalb der Bevölkerung zu schaffen und ethische Fragestellungen offen zu diskutieren.

Abstract

Biological transformation in manufacturing

The shortage of resources and climate change are forcing production technology to think about its traditional value creation. This is the starting point for biological transformation. It uses nature as a model and can therefore be seen as the next necessary technological leap not only towards sustainable but also resilient production. The fusion of technology, biotechnology and information technology will create a bio-intelligent system that will be the heart of biological transformation. Like the natural ecosystem, tomorrow's production will react autonomously and without central control to any changes, will use its materials and energies as long and sensibly as possible and will take human needs into account. For successful implementation, interdisciplinary knowledge transfer is absolutely essential. In addition, politics and economy are responsible for creating acceptance within the population and discussing ethical questions openly.

1 Einleitung und Motivation

Die industrielle Wertschöpfung ist das Herz der deutschen Volkswirtschaft und der größte Motor für Innovationen in Deutschland. Gleichzeitig wirkt sich diese auf unsere Umwelt aus. So ist der globale Ressourcenverbrauch in den letzten 30 Jahren um 118 Prozent gestiegen und im Zuge des Bevölkerungswachstums ist bis 2050 mit einer weiteren Verdopplung zu rechnen. Ineffiziente Produktionsprozesse und unbedachter Konsum treiben den Klimawandel immer weiter an und bedrohen dadurch nicht nur unsere traditionelle Wertschöpfung, sondern auch unser eigenes Dasein. Daher setzt eine Entkopplung von wirtschaftlichem Wachstum und Ressourcenverbrauch einen radikalen Wandel voraus. Dieser Wandel bezieht sich insbesondere auf derzeitige Produktionsweisen, da nur durch eine Änderung dieser gleichzeitig unsere Lebensstandards aufrechterhalten und natürliche Ressourcen geschont werden können. [1], [2], [3]

Deutschland ist mit seiner exzellent aufgestellten Wirtschaft und Forschungslandschaft in der Lage, relevante Lösungsbeiträge zur Bewältigung der großen gesellschaftlichen Herausforderungen zu entwickeln und bildet den Ausgangspunkt für eine an nachhaltigen Lösungen ausgerichtete Forschungsstrategie. Daher stellen Fraunhofer und Partner dem digitalen Wandel einen biologischen Wandel an die Seite und schaffen mit der biologischen Transformation den nächsten notwendigen Technologiesprung in Richtung nachhaltiger Produktion. Die biologische Transformation bringt ein neues Denken mit sich und nutzt die Natur als Vorbild, ein resilientes Produktionssystem zu schaffen. Die Produktion der Zukunft soll nicht länger durch lineares Denken und einseitige Output-Optimierung geprägt sein, sondern sich wie die Natur als ganzheitliches und vernetztes System organisieren. Daher ist es von großem Interesse, die Idee der Kreislaufwirtschaft in die Produktion zu integrieren, sodass das Naturprinzip der Ressourceneffizienz und der Stoffkreisläufe genutzt werden kann. Die Natur zeichnet sich durch Vielfalt und Diversität aus, die es ihr erlauben, auf Änderungen in der Umgebung ohne zentrale Steuerung robust zu reagieren. Eine Adaption dieser Eigenschaften in Produktionssysteme bergen großes Potenzial. Eine flexible, sich selbstregulierende vollautonome Produktion wird möglich, die Störungen eigenständig identifiziert, behebt und als Potenzial für ihre eigene Optimierung sieht. Dabei wird nicht auf einen oft zeitlich begrenzten Hauptzweck hin maximiert, sondern es findet wie in der Natur eine Anpassung an mehrere Randbedingungen gleichzeitig statt. [2], [4], [5]

Die folgende Aussage des Historikers Yuval Noah Harari beschreibt diese zukünftige Entwicklung sehr zutreffend:

„Vier Milliarden Jahre lang war alles Leben auf der Erde organisch und entwickelte sich durch natürliche Selektion. Jetzt verlassen wir den organischen Pfad und begeben uns ins Unorganische. Wir erschaffen unorganische Lebensformen, die keiner Evolution durch natürliche Selektion unterworfen sind. Die Evolution wird mehr und mehr durch intelligente Konstruktionen ersetzt.“ [7]

In diesem Zusammenhang wird es auch eine stärkere Konvergenz von Maschine und Mensch geben. Während der Mensch durch externe Geräte (z.B. Exoskelette) maschinentypische Eigenschaften wie ausdauernde Kraft übernimmt, adaptiert die Maschine menschliche Charakteristiken. So kann durch die Verschmelzung von Technik, Bio- sowie Informationstechnologie ein biointelligentes System geschaffen werden, das das Herzstück der biologischen Transformation ausmachen wird. [1], [2]

Im Weiteren werden die Anwendungsfälle „Kreislaufwirtschaft“, „Abweichung ist Potenzial“ und „Konvergenz Mensch Maschine“ in Bezug auf das AWK Motto „Turning

„Data into Value“ näher betrachtet. Dabei bezieht sich das „Turning“ auf den tatsächlichen Arbeitsauftrag, der beispielsweise durch die Nachhaltigkeitsziele der UN definiert ist, das „Data“ auf die Produktionstechnologie selbst oder die dadurch entstehenden virtuell zur Verfügung stehenden Daten im digitalen Zwilling und das „into Value“ auf das bestehende Anreizsystem, welches die Änderung zur Folge hat.

2 Systematik der Biologisierung

In der biologischen Evolution sind die Gene von Organismen natürlich vorkommenden Mutationen ausgesetzt, die sich positiv, negativ oder gar nicht auf Erben auswirken können. Dadurch entsteht genetische Variabilität, die ein erfolgreiches Individuum definiert. Da es zwischen diesen erfolgreichen Individuen zur Fortpflanzung (Rekombination) kommt, können sich Arten über lange Zeiträume an einen vorliegenden Selektionsdruck anpassen (z.B. Klimaveränderungen oder die Erschließung einer ökologischen Nische) und so ihr Überleben sichern. Eine unmittelbare Adaption und Übertragung dieser evolutionären Prozesse und Prinzipien der Natur auf technische Entwicklungen ist zwar aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheit der Systeme nicht so einfach möglich, allerdings können diese sich annähern. [6]

Diese Postulierung einer Konvergenz ist damit begründet, dass Informationen sowohl bei Lebewesen als auch in technologischen Entwicklungen auf logischen Grundlagen beruhen und sich Erkenntnisse aus den jeweiligen Bereichen gegenseitig inspirieren können. Das natürliche Ökosystem, in der die vorhandenen Lebewesen im Gleichgewicht miteinander interagieren, kann auf ein digitales Ökosystem in der Produktion übertragen und erweitert werden (vgl. Bild 1). Dieses besteht genau wie das natürliche Ökosystem aus heterogenen Systemen, die miteinander vernetzt sind und dessen Akteure mit der Umgebung kommunizieren. Das übergeordnete Ziel und damit der Wert des digitalen Ökosystems ist es, das Potenzial zu schaffen, Gewinne zu erzielen und vergleichbar zum lebenden Organismus als Organisation zu überleben. [22]

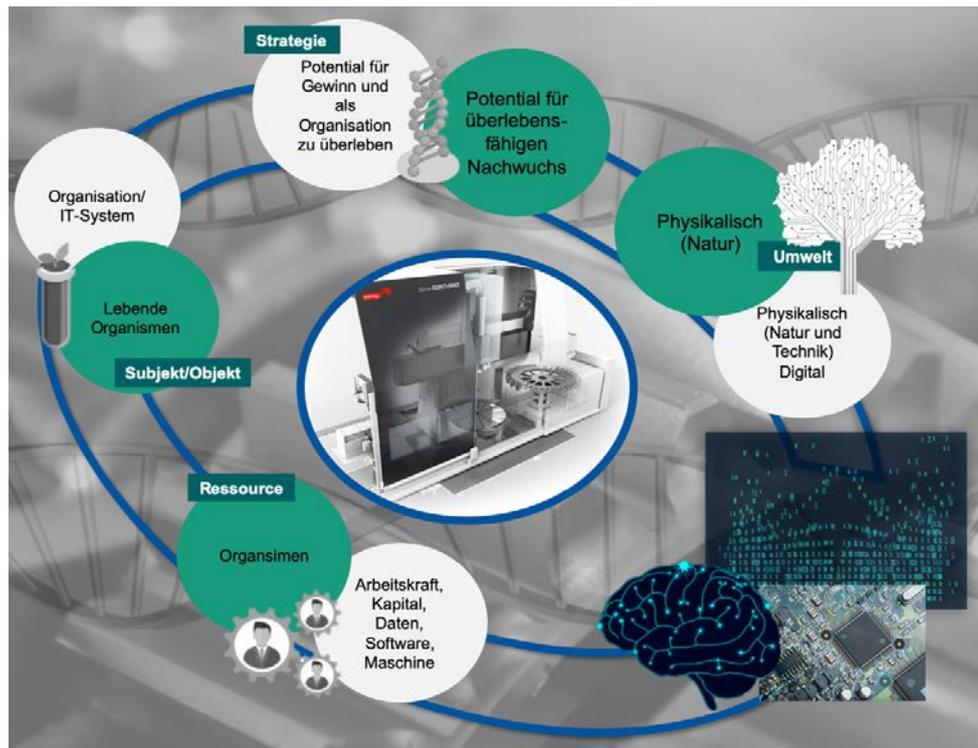


Bild 1: Gegenüberstellung von natürlichem und digitalem Ökosystem bezogen auf die Produktion nach [22]

In diesem Zusammenhang ist die Unterscheidung zwischen dem Top-down und dem Bottom-up Prinzip zu nennen. Beim Top-down Prinzip ist ein technisches Problem vorhanden, für das bislang keine Lösung existiert und daher in der Biologie nach potenziellen Ansätzen gesucht wird, die wiederum technisch zu interpretieren sind. Der Bottom-up-Ansatz beginnt mit der Analyse von Naturphänomenen, gefolgt von einer Abstraktion der biologischen Prinzipien und einer Suche nach einer technischen Anwendung. [8]

Um diese noch sehr abstrakte Darstellung greifbarer zu machen und für die Produktion weiter zu konkretisieren, kann die biologische Transformation in drei Entwicklungsstadien unterteilt werden: Inspiration, Integration und Interaktion (vgl. Bild 2). [1], [2]

Im ersten Entwicklungsmodus, der Inspiration, werden Konzepte der Natur und evolutionsbiologische Prozesse auf Wertschöpfungssysteme übertragen. Dies ermöglicht die Entwicklung von neuartigen Materialien und Strukturen (z.B. Leichtbau), Funktionalitäten (z.B. Biomechanik) sowie Organisations- und Kooperationslösungen (z.B. Schwarmintelligenz, künstliche neuronale Netze, evolutionäre Algorithmen). Zu der bioinspirierten Wertschöpfung zählen sowohl Techniken, die bereits seit Jahrzehnten existieren und bereits Einzug in Produktion und Konsumentenmarkt gefunden haben, als auch Technologien, die noch aktuelles Forschungsthema sind. Zu den bekannten und bereits eingesetzten Techniken gehört beispielsweise der Lotus-Effekt, der auf den Blättern der gleichnamigen Pflanze entdeckt wurde. Bei dieser sind die Adhäsionskräfte zwischen den Wassertropfen und der Oberfläche der Pflanze so klein, dass diese von der Oberfläche abperlen. Mittels der Imitierung der Nanostrukturen der Lotusblätter werden in der Technik Beschichtungen für Bauteile entwickelt, die beispielsweise das Anlagern von Bakterien vermeiden. Dies ist ein klassisches Beispiel für den Bottom-Up-Ansatz. Ein zurzeit hoch aktuelles Beispiel sind künstliche neuronale Netze, die in der Lage sind, aus komplexen Datenstrukturen sinnvolle Vorhersagen zu erlernen. In der Neurowissenschaft wird von der Hypothese ausgegangen, dass die mentale Aktivität des

menschlichen Gehirns hauptsächlich aus elektrochemischer Aktivität in Netzen von Gehirnzellen, den sogenannten Neuronen, besteht. Diese Vorstellung wurde von der Informatik adaptiert, um künstliche neuronale Netze zu entwickeln. [2], [9]

Die beiden vorgestellten Beispiele divergieren in ihrer Funktionsweise sehr stark und zeigen das breite Anwendungsspektrum. Weitere klassische Beispiele sind in Tabelle 1 abgebildet.

Tabelle 1: Von natürlichen Prozessen inspirierten Technologie-Beispielen nach [2]

Natürliches System	Technisches System
ressourcenschonender Rindenbau	Additive Fertigung
Exoskelett von Insekten	Exoskelett
Knochenstruktur	Leichtbau
Vogelschwarm	Schwarmintelligenz für Organisationen
Fotosynthese in Pflanzen	Künstliche Fotosynthese

Im zweitem Entwicklungsschritt, der Integration, findet das Wissen über die Biologie Anwendung in Form einer Integration biologischer Systeme in traditionelle Produktionssysteme (z.B. Substitution chemischer durch biologische Prozesse). Dies geschieht über die Biotechnologie als Enabler, die nach Definition der OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) „die Anwendung von Wissenschaft und Technik auf lebende Organismen, Teile von ihnen, ihre Produkte oder Modelle von ihnen zwecks Veränderung von lebender oder nichtlebender Materie zur Erweiterung des Wissensstandes, zur Herstellung von Gütern und zur Bereitstellung von Dienstleistungen ist“ [10]. Dabei wird sich die Symbiose, ein Schlüsselprinzip der Evolution, zunutze gemacht. Beispiele für diese Synergiepotenziale von industrieller Wertschöpfung und Natur sind biotechnisch hergestellte Pharmazeutika, Funktionalisierung von Polymeren, die Rückgewinnung von Biokunststoffen aus CO₂-Abfallströmen oder die Gewinnung von Methan aus Industrieabwässern. [1], [3]

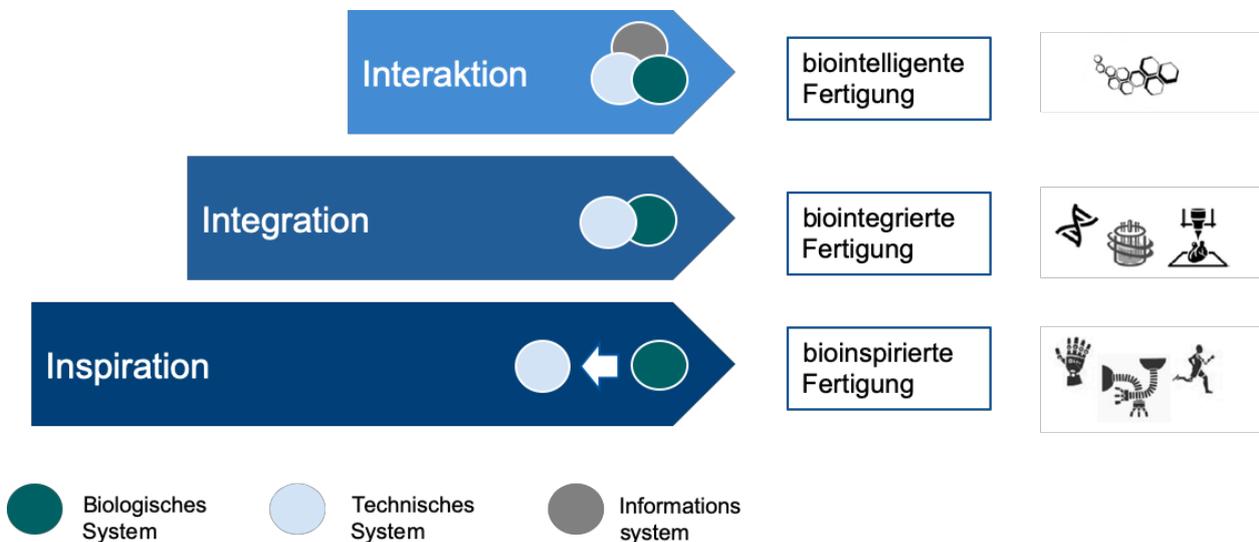


Bild 2: Entwicklungsschritte der biologischen Transformation [1]

Der letzte Schritt, die Interaktion, stellt den ausschlaggebendsten Punkt für die zukünftige Produktionstechnologie dar. Hier wird durch eine umfassende Interaktion von technischen, biologischen und informationstechnischen Systemen eine völlig neue, autarke Wertschöpfungsstruktur, das sogenannte biointelligente Wertschöpfungssystem geschaffen. Dabei wird ein wertschöpfendes System als biointelligent angesehen, wenn es mindestens eine biologische Komponente im Produkt oder Produktionsprozess gibt. Dieses biointelligente System ist nach den Eigenschaften von Lebewesen konzipiert, die die zelluläre Organisation, den Metabolismus, die Homöostase, die Stimulation und Kommunikation, die Reproduktion, die Vererbung und Entwicklung sowie die Bewegung und Entwicklungsfähigkeit miteinschließen. [1], [2]

Bei genauer Betrachtung der Natur kann deutlich beobachtet werden, dass die Dynamik vieler biologischer Systeme und die Gesetze, die sie regeln, auf einer überraschend kleinen Zahl einfacher allgemeiner Regeln beruhen, die ohne eine externe Kontrollinstanz ausgeführt werden. Mit Hilfe dieser Fähigkeiten können zum Beispiel Milliarden von Blutzellen, die das Immunsystem bilden, den Organismus vor den Krankheitserregern schützen, ohne dass eine zentrale Steuerung des Gehirns erforderlich ist. In ähnlicher Weise wird ein ganzer Organismus autonom über die Homöostase in einem relativ stabilen Gleichgewichtszustand gehalten. Der Prozess der Aufgabenverteilung in den Insektenkolonien wird kollaborativ entschieden und entsprechend der Bereitschaft eines Individuums so durchgeführt, dass die Gesamtaufgabe mit einer globalen Intelligenz, die sich aus einfachen individuellen Aktionen zusammensetzt, optimiert wird. [2]

Biointelligente Produktionssysteme zeichnen sich nicht durch einzelne Eigenschaften aus, sondern aus der Summe all ihrer Eigenschaften. Das System ist nicht länger als abgegrenzte Einheit, sondern als lokal vorhandene Ressource zu verstehen. [2]

Somit bietet eine gesamte biointelligente Wertschöpfung die Möglichkeit, Produktionsverfahren mit selbstlernenden Algorithmen zu koppeln, um eine Symbiose lokaler Ressourcen mit ihrer Umgebung zu realisieren. Aufgrund zunehmender Rechenleistungen und Fortschritte in der Informationstechnologie kann dies virtuell über digitale Zwillinge geschehen. So kann ein vernetztes, sich selbst regulierendes digitales Ökosystem geschaffen werden, das genauso wie das natürliche Ökosystem von den lokalen Rahmenbedingungen beeinflusst wird. [1], [2], [22]

3 Übergeordnete Anwendungsfälle in der biologischen Transformation

Im Folgenden werden drei konkrete Anwendungsfälle diskutiert, die im Zuge der biologischen Transformation in der Produktion möglich sind. Diese sind nach Komplexitäts- und Abstraktionsgrad gestaffelt und starten mit der Thematisierung der Kreislaufwirtschaft, gehen dann über zu selbstlernenden Algorithmen, um abschließend die Konvergenz von Mensch und Maschine zu konkretisieren.

3.1 Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft nimmt sich den Stoffkreislauf der Natur zum Vorbild, der alle Prozesse der Produzenten und Konsumenten umfasst, die den Auf-, Um- und Abbau von Stoffen einschließen wie z.B. Photosynthese, Atmung und Gärung. Daher wird innerhalb der Kreislaufwirtschaft versucht, durch intelligente, kaskadische Nutzung ohne Abfälle und Emissionen, Stoffe und Energie möglichst lange und sinnvoll zu nutzen. [12]

Diese Herangehensweise hat in der deutschen Produktion noch keinen breiten und standardisierten Einzug gefunden, obwohl die Etablierung einer nachhaltigen

Wirtschaftslage stetig an strategischer Relevanz in der betrieblichen Leistungserstellung gewinnt. Daher ist die nachhaltige Produktion auch in den Sustainable Development Goals (SDG) wiederzufinden.

„Die Substitution fossiler Ressourcen durch nachwachsende biologische Materialien und Chemikalien sowie die Organisation in geschlossenen Stoffkreisläufen leisten einen signifikanten Beitrag zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks der Wirtschaft. Über die Nutzung biologischer Prozesse und biomimetischer Ansätze können Produktionsprozesse effizienter und somit rohstoffschonender gestaltet werden. Die Nutzung biologischer Prinzipien (z.B. Schwarmintelligenz als digitaler Prozess) kann logistischen Aufwand und industrielle Konzentration an besonders belasteten Standorten reduzieren.“ [3]

Insbesondere befindet sich die deutsche Industrie in der Position dieses Ziel zu erfüllen, da ihre Produkte als robust, funktionell, leistungsstark und langlebig gelten und das Label „Made in Germany“ zunehmend mit Nachhaltigkeit assoziiert wird. [1], [3]

Die gesamte Wertschöpfungskette der Produktion innerhalb kurzer Zeit simultan zu einer Kreislaufwirtschaft zu transformieren ist nicht realistisch, jedoch kann bei der Werkzeugmaschine gestartet werden, um heutige und zukünftig mögliche Konzeptionierungen zu evaluieren. Zurzeit wird die Entscheidung zur Überholung einer Maschine bzw. Wiederverwendung von Werkzeugen oder Maschinenbauteilen aus rein ökonomischer Sicht analysiert und getroffen. Wie in Bild 3 verdeutlicht wird, rentiert sich die Überholung (Retrofit) der Maschine erst mit steigendem Investitionsvolumen. Um ein besseres Verständnis für die Modernisierungsentscheidung zu erlangen, werden die Maschinenteile mit Gebrauchsgegenständen verglichen. Selbst für bereits sehr komplexe Bauteile wie das der Spindel werden zurzeit kaum Wiederverwendungsmaßnahmen angedacht. Anhand des Vergleichsprodukts „Handy“ ist allerdings deutlich zu erkennen, dass dies nicht nur ein Problem der Produktion, sondern auch das des Konsumenten ist. Die Bauteile eines Handys werden in der Regel nicht wiederverwertet oder repariert, sondern entsorgt. Dabei sind Werkzeugmaschinen generell technisch für eine Überholung von Verschleißkomponenten und Steuerungstechnik nach einer Gebrauchsdauer von 10 bis 20 Jahren geeignet bzw. gestaltet.



Bild 3: Wirtschaftlichkeit als Entscheidungsgrundlage für Retrofit

Es ist bei weitem nicht ausreichend, das Verhältnis aus notwendiger Arbeitsleistung und Neuteilen zum Wert der wiederverwendbaren Komponenten als Entscheidungskriterien zu verwenden. Über den Retrofit der Maschine wird eine wertsteigernde Maßnahme an

einer vertrauten, verlässlichen Maschine durchgeführt, wodurch das technische Risiko minimiert wird, welches bei einer Neuinvestition anfallen würde. Anschließend besitzt die Maschine einen neuartigen Charakter und kann nochmals die komplette Zeitspanne verlässlich genutzt werden. Aufgrund bekannter Maschinenperipherie und -performance ist der Anfahrprozess der Produktion nach einer Modernisierung häufig enorm steil, sodass Qualitäts- oder Produktivitätseinbußen verschwindend gering sind. Die Wirtschaftlichkeit ist zudem nochmals dadurch gegeben, dass im Schnitt eine vergleichbare Neumaschine (dieselbe Steifigkeit und Lebensdauer) mit entsprechendem Fundament und Aufstellung sowie Inbetriebnahme zu höheren Kosten und höheren Lieferzeiten führt. Folglich kann bereits heute ohne die Einführung biointelligenter Systeme durch die einfache Wiederverwertung von „alten“ Teilen ein gewisses Maß an Nachhaltigkeit und besserer Ökobilanz erzielt werden.

Die ursprüngliche Auffassung von der Maschine ist die eines mechanischen Gebildes, das eine bestimmte Aufgabe erfüllt und durch konkrete konstruktive Eigenschaften definiert ist. Dabei war die Definition der Maschine immer mit dem technologischen Entwicklungsstand der jeweiligen Zeit verbunden und ist somit nicht statisch, sondern passt sich den technologischen Möglichkeiten an. Die Verschmelzung von Informationstechnik mit dem Ansatz der biologischen Transformation zu einem biointelligenten System bietet die Vorlage, viele Teile der Werkzeugmaschine neu zu denken und in Bezug auf technologische, ökologische und wirtschaftliche Punkte zu optimieren. [13]

Dabei ist ein wesentlicher Gegenstand der Betrachtung das Material, aus der die Maschine gebaut ist. Die Verwendung von Metall als Konstruktionsmaterial kann in Zukunft zunehmend von alternativen Ansätzen ergänzt werden, die aus bioinspirierten oder sogar aus biointelligenten Materialien bestehen. Die insbesondere aus der Luftfahrt bekannten faserverstärkten Verbundwerkstoffe (mit thermoplastischer Matrix) könnten bereits eine Alternative darstellen, da sie gute Festigkeitswerte aufweisen und aufgrund zunehmender Nachfrage sowie besseren Simulationsmöglichkeiten immer günstiger werden. Des Weiteren bietet biologisch abbaubarer Kunststoff sowohl für sich alleingestellt als auch in Kombination mit faserverstärkten Verbundwerkstoffen vielversprechende Möglichkeiten. Biointelligente Materialien, die sich bereits in Forschung befinden oder erst im Zuge der biologischen Transformation entwickelt werden, stellen besonders in Bezug auf den Recyclinggedanken innerhalb der Kreislaufwirtschaft großes Potenzial dar. Denn diese verursachen keine Abfälle oder irreversible Schäden am Ökosystem, sondern ganz im Gegenteil, säubern und bereichern dieses. Somit bieten biologische Strukturen bei minimalem Einsatz von Materialien und Energie eine breite Palette von Eigenschaften. Darüber hinaus wurden biologische Materialien in der Natur so „hergestellt“, dass sie innerhalb des Lebens operieren und daher hohe Temperaturen, hohen Druck oder stark verschmutzendes Material vermeiden. Dies erleichtert in der späteren synthetischen Herstellung dieser Materialien den Fertigungsprozess. [3], [8]

Um den Einsatz biologischer Materialien bei gleichzeitigem Beibehalten der vorherigen Maschineneigenschaften zu beschleunigen, muss sich auch das Maschinendesign ändern. Abhilfe kann hier die Idee von modularen, rekonfigurierbaren Produktionssystemen schaffen, nach denen aufgrund der Individualisierung des Produktangebots und der kleineren Losgrößen ohnehin verlangt wird. Diese Modularität bietet die Möglichkeit, dass zunächst nur einzelne Teile der Maschine aus alternativen Werkstoffen oder neuentwickelten biointelligenten Systemen bestehen. Die additive Fertigung zusammen mit dem 3D/4D Bioprinting ermöglicht die Produktion von biobasierten sowie biohybriden Materialien und damit neuer komplexer Maschinenteile.

So können neue Generationen von Werkzeugmaschinen entwickelt werden, bei denen ökologische Gesichtspunkte unmittelbar mit einfließen können, ohne vorab etablierte Konzepte neu zu denken. Eine Lösung, die die Industrie heute bereits übernehmen könnte, ist eine Verlagerung von ölbasierten auf biobasierte Metallbearbeitungsflüssigkeiten. [2] [8]

Wird nicht nur die Werkzeugmaschine, sondern die gesamte Produktionsfabrik betrachtet, wird sich dem Maßstab des Stoffkreislaufs aus dem natürlichen Ökosystem weiter angenähert. Der ursprüngliche Grund für den Bau von gegenwärtigen Fabriken war die Möglichkeit, eine große Anzahl von Maschinen mit einem Antriebssystem zu betreiben, weil diese energieliefernden Geräte kostspielig waren. Mit der Einführung der Computersteuerung und des Internets, die die Herstellung von individualisierten Produkten innerhalb flexibler Versorgungsnetze und On-Demand-Logistik ermöglichen, sinkt der Bedarf an zentralisierten Fabriken. Dies ändert die Art und Weise der Fabrikplanung und ermöglicht der biologischen Transformation in der Wertschöpfungskette Einzug zu finden. Ein Beispiel wie solch ein System biointelligent gestaltet werden kann und die Idee der Kreislaufwirtschaft im vollen Maß adaptiert, ist in Bild 4 dargestellt. [23], [8]

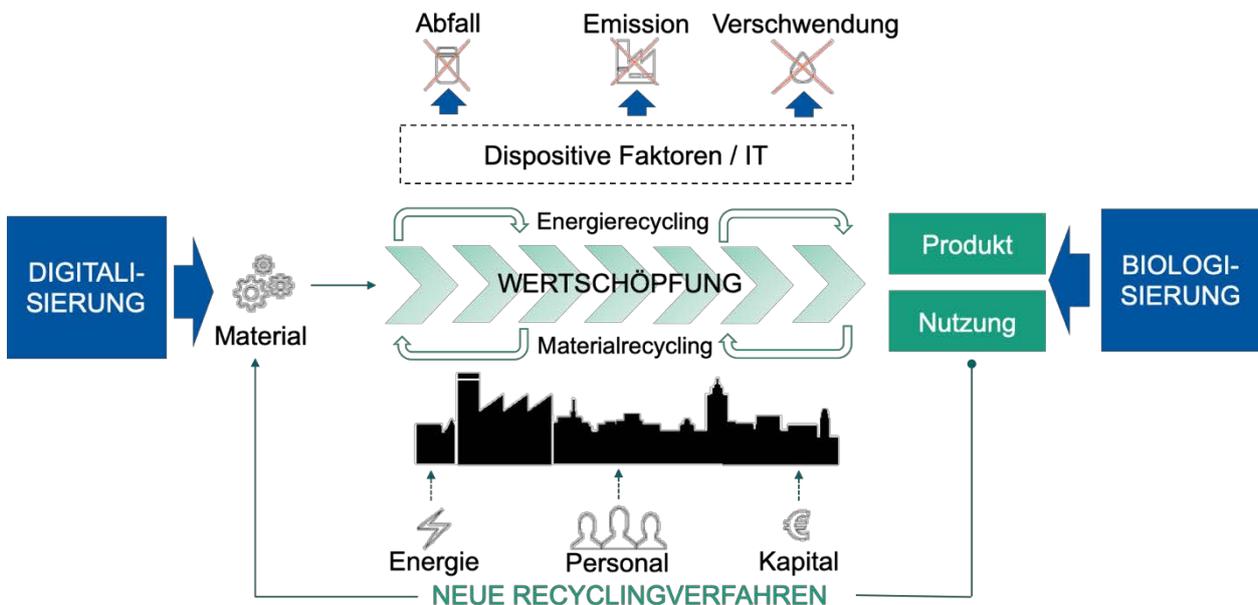


Bild 4: Produktion der Zukunft in der Ultraeffizienzfabrik [23]

Hier wird versucht, eine große Anzahl von möglichen Faktoren miteinander in Einklang zu bringen, um eine ressourcenschonende, energieeffiziente, und emissionsarme Produktion zu erreichen, in der eine Überproduktion vermieden und zudem die biologischen Bedürfnisse der Menschen berücksichtigt werden. Sauer beschreibt die Möglichkeit, dass in Zukunft durch die Verschmelzung von Nano- und Biotechnologie biologische oder biobasierte Materie mit technischen Komponenten kommunizieren. So können Industrie-4.0-fähige Fertigungstechnologien mit Recyclaten interagieren, dessen chemische Zusammensetzung unklar ist. Insgesamt entsteht eine Produktion, die in einem symbiotischen Verhältnis zu ihrer Umgebung ist. [23]

Abschließend lässt sich somit für den Anwendungsfall „Kreislaufwirtschaft“ der Leitsatz „Turning Data into Value“ wie folgt interpretieren: Angeregt durch die Nachhaltigkeitsziele der Politik werden die Produkte, Produktionsmittel, und -technologien so verändert („Data“), dass der Ressourcenverbrauch gesenkt und die Umwelt geschont wird („into Value“).

3.2 Vielfalt in der Produktion

Die Natur zeichnet sich zwar durch Vielfalt und Variation aus, jedoch basieren diese auf generischen Regeln, die die im Ökosystem vorhandenen Entitäten ohne externe Aufsicht regulieren. Diese Regeln müssen mithilfe der Informationstechnik mathematisch übersetzt werden und der Produktion verfügbar gemacht werden. Diese der Natur zugrundeliegenden Regeln werden im Folgenden immer weiter konkretisiert und in mathematischer Form auf die Produktion bezogen.

Für ein biointelligentes System, das sich selbst entwickeln und regulieren soll, ist die Robustheit dieses Systems eine wesentliche Charakteristik. Daher ist das übergeordnete Ziel robuste Produktionsstrukturen zu schaffen, um die Resilienz in der gesamten Wertschöpfungskette zu steigern. In der Biologie wird unter Robustheit eine Eigenschaft verstanden, die es einem System ermöglicht, seine Funktion gegen interne und externe Störungen aufrechtzuerhalten. Dies wird durch Fail-Safe-Mechanismen, einer Modularität sowie Entkopplung des Systems erreicht. Mit den Fail-Safe-Mechanismen werden Redundanzen erschaffen, die eine generell höhere Diversität und Heterogenität vorsehen und somit ausgefallene Komponenten leicht ersetzt werden können. Durch die Modularität können Störungen lokal gehalten werden, um Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu minimieren und über die Entkopplung können Variationen auf niedriger Ebene von Funktionalitäten auf hoher Ebene isoliert werden. Diese Eigenschaften sind aktuell in den meisten Softwarearchitekturen grundsätzlich etabliert und umgesetzt. Für die Produktion ergeben sich deutlich komplexere Anforderungen, weshalb es zum einen schwierig ist, die Bedeutung von Diversität und Heterogenität zu definieren und zum anderen eine Umsetzung verschiedener Produktionsstrategien häufig weder ökonomisch noch technisch umsetzbar ist. Dies würde bedeuten, alle potenziellen Störeinflüsse vorab zu kennen und dementsprechend Lösungen zu implementieren. [8]

Daher muss mit adaptiven, selbstlernenden Algorithmen Abhilfe geschaffen werden, die die klassischen eingesetzten Methoden ersetzen sollen. Diese Algorithmen können sich an einem dem lebenden Organismus zugeschriebenem Prinzip bedienen, dem bekannten Trail & Error Verfahren. Bei diesem Verfahren werden solange zulässige Lösungsmöglichkeiten versucht, bis das gewünschte Resultat gefunden wurde. Ein bekannter Vertreter dieses Optimierungsproblems ist das Reinforcement-Learning. Es besteht aus einem Agenten, der mit seiner Umgebung in definierten Zeitschritten interagiert. An jedem Zeitschritt beobachtet der Agent seinen Zustand, führt basierend auf diesem eine Aktion aus, landet in einem Folgezustand und erhält dafür eine Belohnung. Dieser Vorgang wird fortgesetzt bis das gewünschte Ziel erreicht ist. In Bild 5 wird diese Idee auf ein in Zukunft mögliches Anwendungsfeld in der Produktion dargestellt. [13]

Zurzeit wird die Steuerung der Maschine in Abhängigkeit des auszuführenden Prozesses vorab fest definiert und implementiert. Dies erlaubt nur eingeschränkten Spielraum um auf potentiell auftretende Störsignale zu reagieren. Ein im Sinne der Natur nachhaltig besserer Ansatz wäre, wenn die Maschine basierend auf ihren eigenen Erfahrungen lernt und einer daraus resultierenden Steuerung den Prozess robust ausführt. Beispielsweise könnte in einem Drehprozess der kürzeste Schneidwerkzeugweg eigenständig gefunden und gleichzeitig die notwendigen Schneidparameter optimiert werden. So könnten aufgrund geringerer Fertigungszeiten die Produktionskosten enorm gesenkt werden. Vor allem jedoch ermöglichen die kontinuierlichen Erfahrungswerte des Systems auf Änderungen wie z.B. ein verschlissenes Werkzeug, direkt zu reagieren. [8], [19]

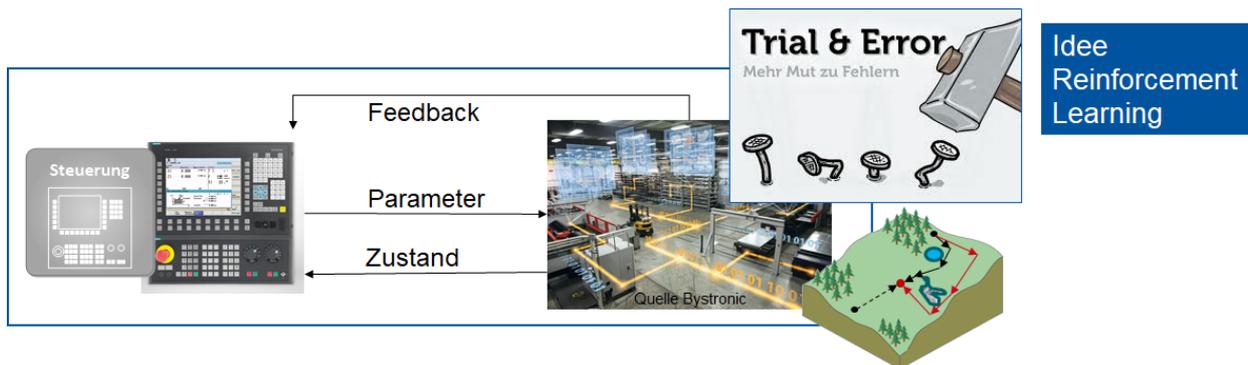


Bild 5: Anwendung eines adaptiven Algorithmus

In der Natur bergen Mutationen, die anfangs scheinbar keinen Nutzen haben oder sogar für das Überleben im vorhandenen Ökosystem hinderlich sind, ein großes Potenzial, da unter anderem durch diese Vielfalt erzeugt wird. In der Produktion auftretende Störungen können in gewisser Weise mit solchen Mutationen verglichen werden. Bislang werden Störungen ausschließlich als Beeinträchtigung angesehen, ohne deren Potenzial zu sehen. Denn sie bieten adaptiven Algorithmen die Chance auf ein sich veränderndes System zu reagieren und eine völlig neue Herangehensweise zu finden, die sich evtl. von der eines Menschen stark unterscheiden würde.

Dass sich die Natur einem limitierten generischen Regelwerk bedient, ist auch an den sich immer wiederholenden Kernbausteinen in den natürlichen Organismen zu erkennen. So besteht beispielsweise jeder Organismus aus DNA oder jeder Mensch aus der grundsätzlichen gleichen Physiologie. Diese Erkenntnis kann sich in den selbstlernenden Algorithmen zu Nutze gemacht werden. Folge ist, dass Entscheidungen nicht auf der offensichtlichen, sondern auf der zugrundeliegenden Struktur getroffen werden und dadurch robuster gegenüber Änderungen sind. Darüber hinaus kann durch identifizierte Kernbausteine des einen Prozesses eine Generalisierung auf andere Produktionsprozesse stattfinden. Vergleichbar zur DNA können hier allgemeingültige Regeln gefunden werden. Um für die bislang erarbeiteten Punkte ein besseres Verständnis zu bekommen, werden diese in Bild 6 anhand des Beispiels der Bliskfertigung verdeutlicht. Das Design einer Blisk wird durch eine große Vielzahl von Parametern bestimmt, die sich aus optimalen aerodynamischen und fertigungstechnischen Rahmenbedingungen ergeben und sich zudem gegenseitig beeinflussen. Somit ist die Wahl des idealen Parametersatzes die Lösung eines komplexen Optimierungsproblems, das mit zurzeit klassischen Verfahren nicht innerhalb kurzer Zeit effizient gelöst werden kann. Daher ist dieser Anwendungsfall ein gutes Beispiel für den Einsatz von biointelligenten Systemen. Die Parameter werden von biologisch inspirierten Algorithmen ausgewählt, die ihre Bewertung und anschließende Wahl an neuen Parametern anhand von identifizierten, zugrundeliegenden Kernbausteinen durchführen. Diese Bausteine können entweder bestimmte physikalische Strukturen in der Beschaffenheit der Blisk sein oder auch abstrakte mathematische Zusammenhänge, die für den Menschen nicht interpretierbar sind. Die so gefertigten Bliskbauteile erlauben nicht nur aufgrund der kürzeren Entwicklungszeit eine Kostenreduktion, sondern auch ein nachhaltigeres Handeln. Denn zum einen wird weniger Ausschuss produziert und zum anderen wird aufgrund des optimalen Bliskdesigns ein höherer Wirkungsgrad und damit ein geringerer Emissionsgrad im Endprodukt erreicht.

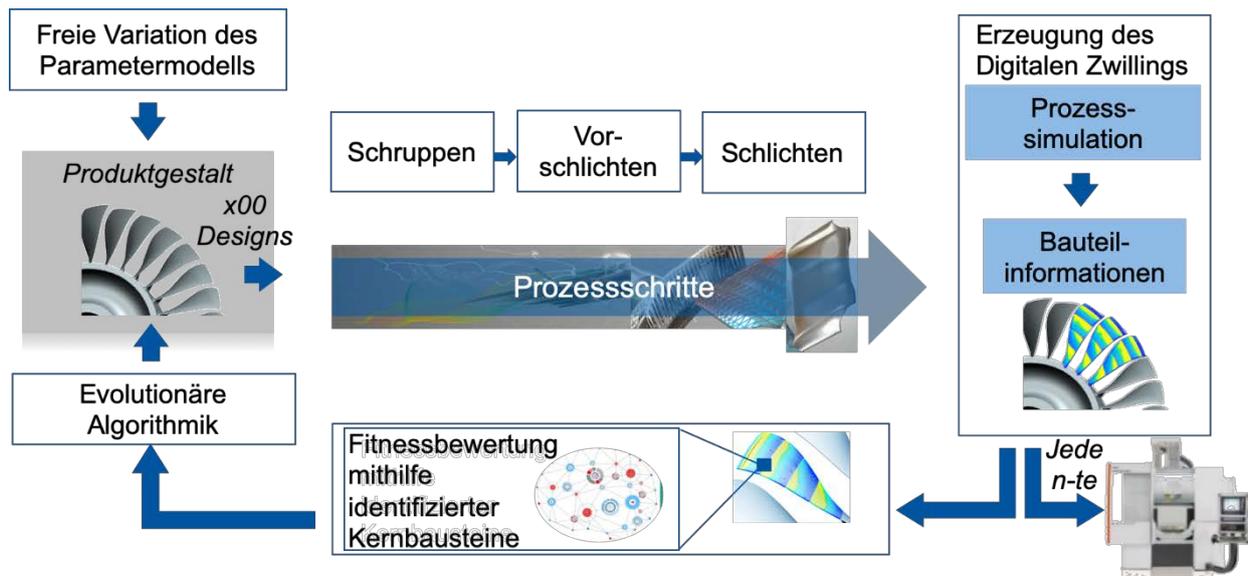


Bild 6: Effiziente Designphase in der Bliskfertigung mithilfe transferierter biologischer Ideen

Der Einsatz eines biointelligenten Systems verlangt zwingend nach einem digitalen Zwilling, in dem die (evolutions-) biologischen Vorgänge initiiert werden können. Dabei übernimmt der digitale Zwilling als Abbild der Planungsinformation die Funktion des Genotyps, dessen 'Fertigungs-Genpool' sich durch die Simulationsergebnisse und Algorithmenzyklen erweitert. Im Allgemeinen kann in der Produktion mit diesem digitalen Modell eine kostengünstige Rekonfiguration bestehender Produktionssysteme erzielt werden, die mit zunehmender Produktvielfalt und der Verkürzung der Produktlebenszyklen erforderlich wird. Es wird unterschieden zwischen dem digitalen Zwilling des Produkts, das die Simulation und Validierung von Produkteigenschaften in der Designphase ermöglicht (z.B. Blisk-Design), dem digitalen Zwilling der Produktion, der Maschinen und Anlagensteuerungen bis hin zu ganzen Fertigungsstraßen virtuell abbildet und dem digitalen Zwilling der Performance, mit dem die kontinuierlichen Zustandsdaten aus dem Betrieb verfolgt werden können. Folglich kann das digitale Modell selbst die Anforderungen und Statusinformationen der Wertschöpfungskette darstellen. Dadurch wird die Generierung von alternativen Lösungen möglich, um zu einem funktionsfähigen Produkt zu gelangen. Wird dieses mit der Idee eines digitalen Ökosystems verbunden, in der die Entitäten miteinander interagieren und sich selbst regulieren, ergeben sich neue Möglichkeiten und Systeme, die beliebig erweiterbar sind. [15], [16]

Dazu sind in Bild 7 zwei Beispiele aufgeführt. In einer Serienproduktion sind nicht immer alle Maschinen bei ihrer maximalen Auslastung, was sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht kontraproduktiv ist, da Instandhaltungskosten dennoch aufgewendet werden müssen. Bereits heute können intelligente Ressourcenmanagementprogramme in der Produktion Einsatz finden, die auf unterschiedliche Produktionsauslastungen, Produktionsausfälle oder situations- und auftragsbedingte Schwankungen reagieren und z.B. die Maschinenzuweisungen optimieren können. Dies ist jedoch nach der Definition der Biologie nicht robust, da die Entitäten nicht modular und entkoppelt voneinander sind. Genauso wie eine Einheit in einem Schwarm oder einer Kolonie sollten die Maschinen unabhängig voneinander sein und autonom in ihren Aktivitäten. Das Immunsystem besteht aus Millionen von Zellen, die effizient Variationen in der dynamischen Umgebung oder Abweichungen vom erwarteten Muster detektieren und bekämpfen. Eine biointelligente Maschine in einem

digitalen Ökosystem sollte sich dieser Fähigkeit bedienen, um eine resiliente Wertschöpfungskette zu gewährleisten. Insbesondere mit der steigenden Komplexität der Produkte ist dies zwingend notwendig, da Fehlfunktionen nicht ohne weiteres auf einzelne Teile oder Baugruppen zurückzuführen sind. [8], [11]

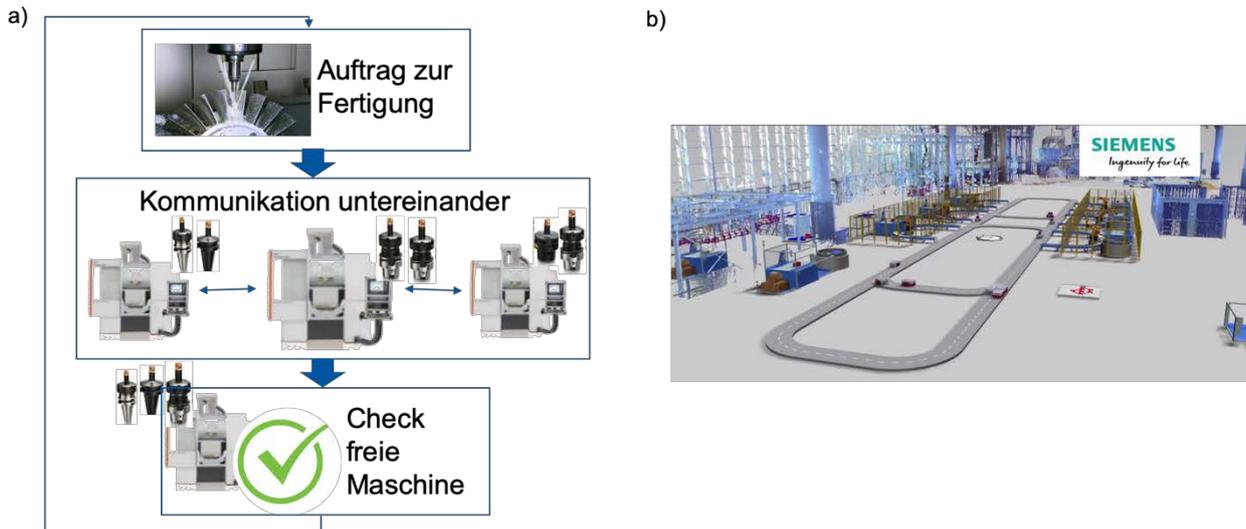


Bild 7: Ressourcenplanung mithilfe eines biointelligenten Systems

An dieser Stelle kann sich auch von dem klassischen Aufbau der heutigen stationären Maschine verabschiedet und von Grund auf neue Konzepte entwickelt werden, die für die Anwendung adaptiver, selbstlernender Algorithmen vorteilhafter sind. Nach Byrne ist es in Zukunft denkbar, dass die Werkzeugmaschine oder ein Schwarm von Werkzeugmaschinen durch das Produkt aufgerufen werden, so wie Bienen zu Pollen gezogen werden. Ein ähnlicher Nutzen kann durch den Einsatz von Roboterschwärmen verfolgt werden, die dezentralisiert Produkte zusammenbauen (vgl. Bild 7 b). Mithilfe von Verteilungsalgorithmen, die auf der Arbeitsweise von Ameisen basieren, könnte die gemeinsame Arbeit in Abhängigkeit der Verfügbarkeit und Nachfrage an einem Produkt durchgeführt werden. Unterstützend kann dabei auch die Idee von Aktivator-Inhabitor System aus der Natur sein, um eine robuste dezentrale Steuerung der Entitäten umzusetzen. Dies könnte die Notwendigkeit von Montagelinien für bestimmte Montagevorgänge überflüssig machen. [8], [11]

Wird zudem von einem biointelligenten System ausgegangen, wie es in Kapitel 2 beschrieben wird, kann durch eine Kommunikation zwischen Produkt und Entität (Maschine, Roboter, Werkzeug) eine zusätzliche Variabilität geschaffen werden. [22], [8] Abschließend lässt sich somit für den Anwendungsfall „Abweichung ist Potenzial“ der Leitsatz „Turning Data into Value“ wie folgt interpretieren: Die auftretende Variation („Turning“) kann mittels der Produktions- und Prozessdaten, die über den digitalen Zwilling virtuell nutzbar gemacht werden, („Data“), in ein besseres Prozessverständnis („into Value“) übersetzt werden, um eine biointelligente Wertschöpfungskette zu erzielen.

3.3 Konvergenz Mensch Maschine

Bislang existierte immer eine klare Grenze zwischen Natur und Technik. Im Gegensatz zu lebenden Systemen besitzen Maschinen keine selbstreplizierenden und selbsterhaltenden Fähigkeiten, sondern müssen von Menschen produziert werden und verlangen nach menschlicher Überwachung und Steuerung. der biologischen Transformation verschwimmen diese Grenzen stetig, sodass von einer Konvergenz zwischen Mensch und Maschine gesprochen werden kann (vgl. Bild 8). [13]

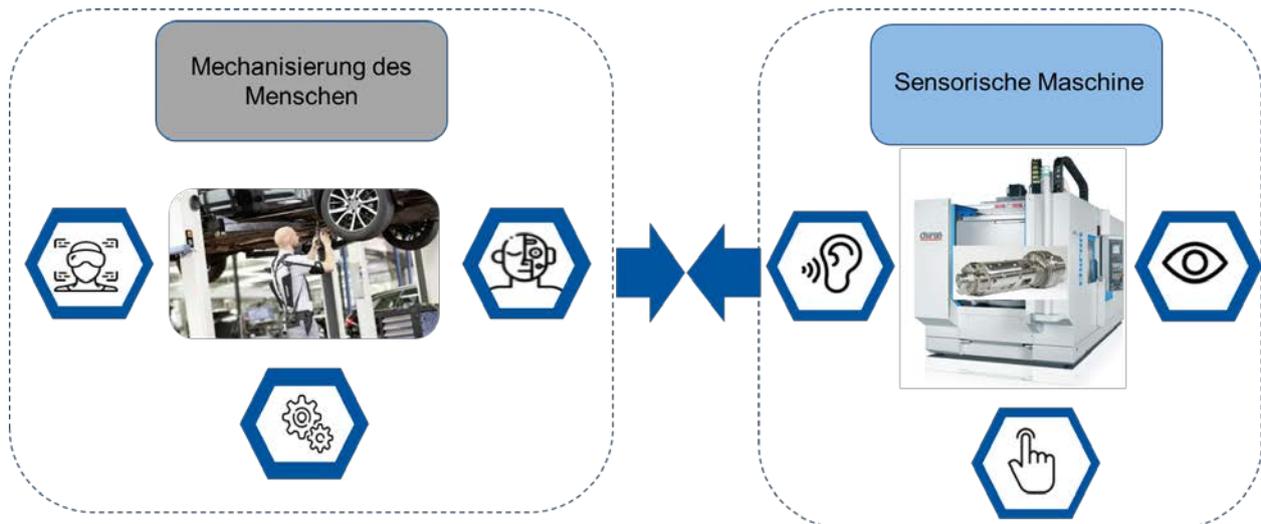


Bild 8: Konvergenz Maschine Mensch

Der Mensch wird stückweise mechanisiert, um Qualität und Produktivität sowie das Wohlergehen des Menschen zu steigern. Zurzeit bekannte Beispiele sind das Exoskelett, die Brain-Computer-Schnittstellen und die AR-Technik, die teilweise bereits Einzug in die Produktion gefunden haben. Exoskelette dienen als externes Skelett und unterstützen die Körperbewegung des Menschen. Zukünftig können diese Arbeiter in der Produktion bei ihren täglichen Aufgaben helfen und entlasten. So kann präventiv die ergonomische Arbeitssituation der Arbeiter verbessert und die Ausfalltage durch Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSD) reduziert werden. Des Weiteren ist die Arbeit mit einem Exoskelett intuitiver und damit in einer kürzeren Zeitspanne erledigt als beispielsweise die mit einer teuren mobilen Hebehilfe, sodass eine verbesserte Produktivität und vor allem Flexibilität in bestimmten Teilprozessen der Fertigung möglich wird. In gewisser Weise steht der Einsatz von Menschen in der Produktion im Widerspruch zu einer autonomen von Algorithmen gesteuerten Produktion, die im vorherigen Kapitel thematisiert wurde. Allerdings ist der (mechanisierte) Mensch für die bereits angesprochene Flexibilität und die schwer zu automatisierende Massenanpassung, die zunehmend aus manuellen Prozessen bestehen wird, sehr wichtig. Demnach erhöht dies die Variantenvielfalt, die für eine konsequente Wettbewerbsfähigkeit für zukünftige Megatrends notwendig ist. [1], [17]

Brain-Computer-Schnittstellen (BCIs) sind Geräte, die sowohl Signale vom Nervensystem aufzeichnen als auch Eingaben unmittelbar an das Nervensystem übermitteln und das Gehirn transkranial stimulieren. Diese übersetzen mittels maschineller Lernverfahren die Absichten des Benutzers in Ausgaben oder Handlungen, indem sie entweder dem Operator einen Stimulus präsentieren und auf seine Antwort warten oder die kognitive Aktivität des Operators kontinuierlich überwachen und entsprechend reagieren. Werden die entsprechenden Signale an eine Maschine gesendet, ermöglichen BCIs eine direkte Kommunikation zwischen Gehirn und Maschine, unabhängig von den körperlichen Fähigkeiten des Benutzers, und stellen somit eine neue Technik dar, die menschlichen Fähigkeiten zu erweitern. Diese Technik findet Anwendung in zahlreichen Bereichen wie z.B. der Neuroergonomie, der Kommunikation und Kontrolle, der Bildung und Selbstregulation sowie im Bereich des Spiel- und Unterhaltungssektors. In der Produktion ist ein vielseitiger Einsatz denkbar, der von der direkten Bedienung der Maschine bis hin zur Steigerung der Gehirnleistung der Arbeiter geht. [2] [18]

Die Konvergenz von Mensch und Maschine treffen bei der Idee des Dataismus aufeinander, der die Grenzen zwischen Menschen und Maschinen einreißt. Aus dataistischer Sicht ist die menschliche Spezies ein einziges Datenverarbeitungssystem. Demnach nimmt der Dataismus gegenüber der Menschheit eine streng funktionale Haltung ein und bemisst den Wert menschlicher Erfahrungen alleine nach ihrer Funktion in den Datenverarbeitungsmechanismen. Menschen sind Mikrochips und die Geschichte ein Prozess, der der Effizienzsteigerung des Systems dient. Dies wird gesteuert über die Zahl und Vielfalt der Prozessoren, die Anzahl deren Verbindung untereinander sowie der Bewegungsfreiheit an bereits bestehenden Verbindungen. Wird diese Vorstellung wiederum auf die Maschine bezogen, kann der zurzeit unflexible und starre Hardwareteil der Maschine durch die biologische Maschine aufgelöst werden. Dabei wird die Entstehung und Wiederauflösung der Maschine selbst Teil des Rechenprozesses und kann in gewisser Weise aktiv gesteuert werden. [21]

Abschließend lässt sich somit für den Anwendungsfall „Konvergenz Mensch Maschine“ der Leitsatz „Turning Data into Value“ wie folgt interpretieren: Durch die gegenseitige Inspiration („Turning“) können völlig neue Prozessdaten („Data“) zu einer Steigerung der Produktivität, Flexibilität sowie Qualität („into Value“) führen.

4 Blick in die Zukunft

Das Herzstück der biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfungskette ist die Entwicklung von neuen Produktionstechnologien und –prozessen. Durch die Verschmelzung von Technik, Bio- und Informationstechnologie wird der Grundstein für neue Disziplinen und dem damit verbundenen notwendigen Umdenkprozess für eine nachhaltige Zukunft gelegt. Dies bietet der deutschen Industrie großes Potenzial für Innovationen, die nicht nur in der Technik, sondern auch in Wirtschaft und Politik Einzug finden. Derzeit ist Deutschland aufgrund vergleichsweise restriktiver Gesetzgebung und dem eingeschränkten Zugang zu Risikokapital insbesondere in den Bio- und Informationstechnologien nicht führend. Durch die biologische Transformation kann der Vorsprung, der beispielsweise die USA oder China in diesen Technologien besitzen, aufgeholt und ausgebaut werden. [1], [3]

Die Produktionslandschaft von morgen kann von selbstlernenden Algorithmen und autonomen Systemen geprägt sein, die sich zu einer biointelligenten Wertschöpfung zusammenschließen. Diese führt nicht nur zu einer höheren technischen Qualität der Produkte, sondern auch zu einem nachhaltigeren Schutz der Umwelt sowie der Verbesserung menschlicher Bedürfnisse. So werden körperliche und geistige Entlastungsmöglichkeiten wie z.B. Exoskelette zu Standards und reduzieren die durchschnittliche Arbeitsbelastung der Mitarbeiter mit signifikantem Benefit auf ihr Gesundheitssystem. Potenziell weitere für die biologische Transformation wichtige Technologien und deren mögliche Einführung wird im Gartner-Hype-Zyklus in Bild 10 sichtbar.

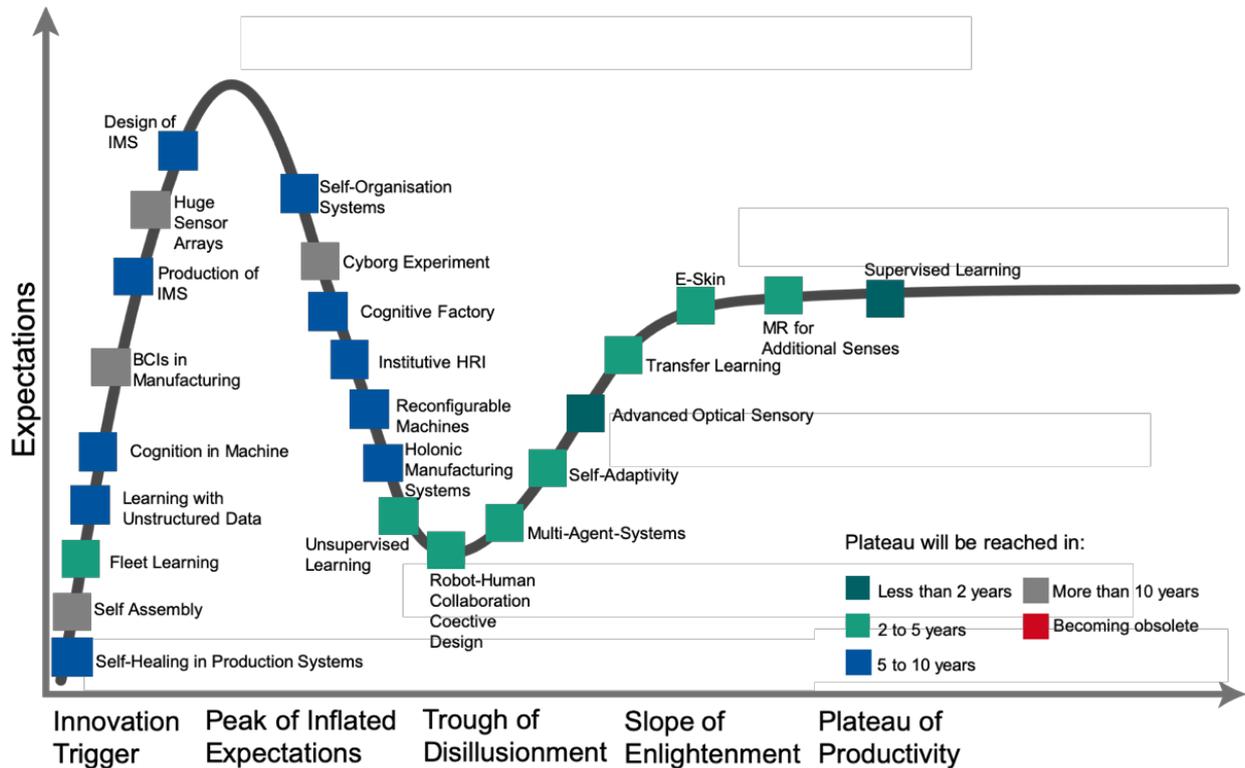


Bild 10: Gartner Hype Zyklus für potenzielle Technologien der biologischen Transformation [8]

Für eine effiziente Entwicklung und Umsetzung der Technologien muss ein Wissenstransfer zwischen den unterschiedlichen Forschungsdisziplinen stattfinden. Daher muss der Open-Source Gedanke, der sich im Software Segment gebildet und etabliert hat, auch in der Produktion Einzug finden. Dies erleichtert die Definition von Standardisierungen, die in einer komplexen, dynamischen Umgebung notwendig sind, um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden. Dabei sollen diese Standards nicht als fixe Gebilde angesehen werden, sondern offen sein für Änderungen und Überarbeitungen. [1], [8]

Die Realisierung neuer Technologien birgt gleichzeitig auch immer die Chance innovativer Geschäftsmodelle, die zukünftig unter ökonomischen und ökologischen Aspekten entwickelt werden sollten. Durch Maßnahmen der Politik wie z.B. Subventionierungen oder Besteuerungen können diese unterstützt werden und die Start-up Kultur in Deutschland fördern. So kann sich beispielweise an der Idee des Car-Sharing orientiert und in Form einer Sharing Economy in die Produktion integriert werden, in der je nach Auslastungsgrad teure Werkzeuge oder Maschinen verliehen bzw. gemietet werden können. Dabei ist dieses Geschäftsmodell für beide Parteien profitabel, da die eine mit zwischenzeitlich ungenutzten Ressourcen dennoch einen Gewinn erzielen kann und die andere sich die Anschaffungskosten erspart. Aufgrund effizienterer Ressourcennutzung kann zudem ein Beitrag zur Nachhaltigkeit geschaffen werden. [1], [3]

Politik und Wirtschaft stehen in der Verantwortung eine Akzeptanz der biologischen Transformation in der Bevölkerung zu schaffen. Diese geht mit der Angst vor sich ändernden Arbeitsbedingungen und dem möglichen Kontrollverlust der Produktionsprozesse einher. Insbesondere mit der postulierten Konvergenz ergeben sich ethische Fragestellungen, die offen kommuniziert und diskutiert werden müssen. Werden sicherheitskritische Komponenten auf Basis von autonomen, selbstlernenden Algorithmen produziert, entsteht zwangsläufig ein größeres Maß an Unsicherheit. Die

Gewährleistung einer hohen Qualität dieser Produkte ist jedoch zwingend notwendig, weshalb über neue Konzepte der Qualitätssicherung nachgedacht werden muss. Die Realisierung eines biointelligenten Produktionssystems verlangt allerdings nach einem gewissen Grad an Unsicherheit, da sich die Natur auch nicht durch einen klaren Determinismus auszeichnet, sondern durch die Interaktion der Gene mit ihrer Umwelt. Demnach stellen sich zahlreiche technische, ethische und soziale Fragestellungen, die zu klären bleiben. Insgesamt benötigt die biologische Transformation derzeit enorme politische Unterstützung, um deren Vorteile und Potenziale vollständig nutzen zu können.

[1]

Literatur

- [1] Miehe, R.; Bauernhansl, T.; Beckett, M.; Brecher, C.: The biological transformation of industrial manufacturing. Technologies, status and scenarios for a sustainable future of the German manufacturing industry. In: Journal of Manufacturing Systems. 54. Jg., 2020, Januar, S. 50-61.
- [2] Miehe, R.; Bauernhansl, T.; Schwarz, O.; Traube, A.: The biological transformation of the manufacturing industry. Envisioning biointelligent value adding. In: Procedia CIRP. 72. Jg., 2018, S. 739-743.
- [3] Kompetenzzentrum Biointelligenz: Die biointelligente Wertschöpfung. White Paper des Kompetenzzentrums Biointelligenz. URL: <https://www.iao.fraunhofer.de/images/iao-news/bio-intelligenz.pdf> [Stand: 27.02.2020].
- [4] Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen: Forschungsstrategie. Fortschritt NRW. Forschung und Innovation für nachhaltige Entwicklung 2013 – 2020. Düsseldorf, 2013.
- [5] Schwarz, O.: OPTIMIEREN STATT MAXIMIEREN – DER ABSCHIED VOM LINEAREN DENKEN. In: Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.): Biologische Transformation und Bioökonomie. München, 2018, S. 22-23. URL: <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschung/artikel/2018/Biologische-Transformation/Whitepaper-Biologische-Transformation-und-Bio-Oekonomie.pdf> [Stand: 25.02.2020].
- [6] Marzi, T.; Knappertsbusch, V.; Marzi, A., Naumann, S.; Deerberg, G.; Eckhard, W.: Fragen zu einer biologischen Technik. Oberhausen: Karl Maria Laufen, 2018.
- [7] Harari, Y. N.: „Das System ist erstarrt“. URL: https://www.handelsblatt.com/arts_und_style/kunstmarkt/yuval-noah-harari-intelligente-technologie/20461518-4.html?ticket=ST-5752688-uY3IMllbeqNI4ETZ2B4Y-ap5 [Stand: 27.02.2020].
- [8] Byrne, G.; Dimitrov, D.; Monostori, L.: Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 21. Jg., 2018, Mai, S. 1-32.
- [9] Russel, S.: Künstliche Intelligenz. Ein moderner Ansatz. 3., aktualisierte Auflage. München: Pearson, 2012.

- [10] Biotechnologie.de: Was ist Biotechnologie?. URL: https://biotechnologie.de/knowledge_base_articles/1-was-ist-biotechnologie [Stand: 02.03.2020].
- [11] Dressler, F.; Akan, O.; Marzi, A.: A survey on bio-inspired networking. In: Computer Networks. 54. Jg., 2010, Nr. 6, S. 881-900.
- [12] Europäisches Parlament: Kreislaufwirtschaft. Definition und Vorteile, URL: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile> [Stand: 03.03.2020].
- [13] Trogemann, G.: Synthese von Maschine und Biologie. Organische Maschine und die Mechanisierung des Lebens. In: Gramelsberger, G.; Bexte, P.; Kogge, W. (Hrsg.): Synthesis. Zur Konjunktur eines philosophischen Begriffs in Wissenschaft und Technik. Bielefeld: transcript, 2013, S. 171-197.
- [14] Sutton, R.; Barto, A.: Reinforcement Learning: An Introduction. Second edition. Cambridge: MIT Press, 2018.
- [15] Talkhestani, B.; Schlögl, W.; Weyrich, M.: Synchronisierung von digitalen Modellen. Anwendung einer Ankerpunktmethod für Fertigungszellen. In: atp magazin. 59. Jg., 2017, Nr. 07-08, S. 62-69.
- [16] Siemens: Digitalisierung in der Industrie. Zwillinge mit Potenzial, URL: <https://new.siemens.com/global/de/unternehmen/stories/industrie/der-digitale-zwilling.html> [Stand: 4.03.2020].
- [17] Dahmen, C.; Wöllecke, F., Constantinescu, C.: Challenges and Possible Solutions for Enhancing the Workplaces of the Future by Integrating Smart and Adaptive Exoskeletons. In: Procedia CIRP. 67. Jg., 2018, S. 268–273.
- [18] Yang, G.-Z.; Bellingham, J.; Dupont, P. E.; Fischer, P.; Floridi, L.; Full, R.; Jacobstein, N.; Kumar, V.; McNutt, M.; Merrifield, R.; Nelson, B. J.; Scassellati, B.; Taddeo, M.; Taylor, R.; Veloso, M.; Wang, Z. L.; Wood, R.: The grand challenges of Science Robotics. In: Science Robotics. 3. Jg., 2018, Nr. 14. DOI: 10.1126/scirobotics.aar7650.
- [19] Chou, Y.-C.; Cao, H.; Cheng, H. H.: A bio-inspired mobile agent-based integrated system for flexible autonomic job shop scheduling. In: Journal of Manufacturing Systems. 32. Jg., 2013, Nr. 4, S. 752-763.
- [20] Klaus, G.: Wörterbuch der Kybernetik. Bd. 1. Frankfurt a.M.: Fischer, 1971.
- [21] Harai, Y.: Homo Deus. Eine Geschichte von Morgen. 11. Aufl. München: C.H. Beck, 2017.
- [22] Liggesmeyer, P.; Dörr, J.: KOMPLEXITÄT UND GLEICHGEWICHT – DIGITALE ÖKOSYSTEME. In: Biologische Transformation und Bioökonomie. München, 2018, S.18-19.
URL:<https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschung/artikel/2018/Biologische-Transformation/Whitepaper-Biologische-Transformation-und-Bio-Oekonomie.pdf> [Stand: 25.02.2020].

- [23] Sauer, A.; Miede, R.: ULTRAEFFIZIENTE PRODUKTION IN DER FABRIK DER ZUKUNFT. In: Biologische Transformation und Bioökonomie. München, 2018, S.20-21.
URL:<https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschung/artikel/2018/Biologische-Transformation/Whitepaper-Biologische-Transformation-und-Bio-Oekonomie.pdf> [Stand: 25.02.2020].

Mitarbeiter der Arbeitsgruppe für den Beitrag 2.2:

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, WZL der RWTH Aachen und Fraunhofer IPT

Dr.-Ing. Alexander Broos, VDW, Frankfurt am Main

Bernd Essig, Mapal, Aalen

Prof. Dr. Boris Hofmann, Aesculap, Tuttlingen

Dr.-Ing. Guilherme Mallmann, Blum-Novotest, Willich

Dr.-Ing. Thomas Muecke, Siemens, Stuttgart

Dr.-Ing. Marcus Queins, Starrag, Mönchengladbach

Dr.-Ing. Martin Streichfuss, Roland Berger, Düsseldorf

Armin Tavakolian, Fraunhofer IPT, Aachen

Daniel Zontar, Fraunhofer IPT, Aachen