

3.1 Funktionale Rückverfolgbarkeit von Prozessketten

Ein daten- und modellbasierter Ansatz

T. Bergs, J. Brimmers, G. Kappmeyer, C. Löpenhaus, F. Scheffler, U. Thies, N. Troß, J. Wemhöner, H. Yakaria

Gliederung

1	Was ist Rückverfolgbarkeit?	211
1.1	Externe Rückverfolgbarkeit	211
1.2	Interne Rückverfolgbarkeit	212
1.3	Funktionale Rückverfolgbarkeit von Prozessketten.....	213
2	Daten- und modellbasierte Produktion	214
2.1	Data Analytics	215
2.2	Model-Based Data Analytics	216
2.3	Herausforderungen bei der Implementierung.....	216
3	Digitaler Zwilling in der Fahrradfertigung	218
4	Datenschnittstelle	221
5	Vision - (Traum)fabrik der Zukunft.....	222
6	Fazit und Ausblick	223

Kurzfassung

Funktionale Rückverfolgbarkeit von Prozessketten

Der Weg vom Rohteil zum einsatzfertigen Produkt kann mit unterschiedlichen Prozesstechnologien beschriftet werden, die sich in ihrer Eignung zur Bearbeitung eines Bauteils, der erzielbaren Bauteilfunktionalität sowie der Wirtschaftlichkeit unterscheiden. Zur Sicherstellung der Bauteilfunktionalität spielt die Rückverfolgbarkeit eine entscheidende Rolle. Denn im Falle eines Qualitätsproblems muss der Hersteller in der Lage sein, umgehend die Fehlerursache zu identifizieren und wirksame Maßnahmen zu dessen Behebung zu ergreifen. In der Regel werden hohe Anforderungen an die Beherrschung der Fertigungsprozesskette hinsichtlich Verfügbarkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit (Produktivität) gestellt. Die in den einzelnen Fertigungsschritten aufgezeichneten Daten müssen zu jeder Zeit verfügbar sein und aktuelle Informationen über das Bauteil, die vorangegangenen Prozesse sowie die verwendeten Produktionsmittel enthalten.

Ein datenbasierter Ansatz zur Prozessgestaltung bietet das Potenzial, die Fertigungsprozesse effizienter zu gestalten und gleichzeitig einen höheren Informationsgehalt für die Rückverfolgbarkeit zu generieren. Eine Kopplung mit Prozessmodellen erlaubt die nachhaltige Abbildung funktionaler Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und somit eine technologische Abstimmung der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich der resultierenden Bauteileigenschaften. Ziel ist es, die Funktionalität des Bauteils sicherzustellen, ohne dass der laufende Betrieb eingestellt wird.

Abstract

Functional Traceability of Process Chains

The path from the raw part to the ready-to-use product can be taken with different process technologies, which differ in their suitability for processing a component, the achievable component functionality and the economic efficiency. Traceability plays a decisive role in ensuring component functionality. In the event of a quality problem, the manufacturer must be able to identify the cause of the fault immediately and take effective measures to rectify it. As a rule, high demands are placed on the control of the manufacturing process chain with regard to availability, quality and efficiency (productivity). The data recorded in the individual production steps must be available at all times and contain up-to-date information about the component, the preceding processes and the production resources used.

A data-based approach to process design offers the potential to make manufacturing processes more efficient and at the same time generate a higher information content for traceability. A coupling with process models allows the sustainable mapping of functional cause-effect relationships and thus with a technological coordination of the individual process steps with regard to the resulting component properties. The aim is to ensure the functionality of the component without stopping the current operation.

1 Was ist Rückverfolgbarkeit?

Der Begriff *Rückverfolgbarkeit* (englisch *Traceability*, von *Trace* „Spur“ und *Ability* „Fähigkeit“) ist vielfältig und kann je nach Industriebereich unterschiedlich definiert sein. In der System- und Softwareentwicklung bezeichnet Rückverfolgbarkeit die Zuordenbarkeit von Anforderungen zu beliebigen Artefakten über den gesamten Entwicklungsprozess [1, 2]. Im produzierenden Gewerbe (z. B. Automobil-, Lebensmittel- und Pharmaindustrie) wird die Rückverfolgbarkeit als die Fähigkeit verstanden, alle Prozesse von der Rohstoffbeschaffung über die Produktion bis hin zum Verbrauch und zur Entsorgung zu verfolgen [3]. Die Internationale Organisation für Normung (ISO) hat in der ISO 9000 die Rückverfolgbarkeit wie folgt definiert:

„Möglichkeit, den Werdegang, die Verwendung oder den Ort eines Objektes zu verfolgen. Bei einem Produkt oder einer Dienstleistung kann sich Rückverfolgbarkeit beziehen auf die Herkunft von Werkstoffen und Teilen, auf den Ablauf der Verarbeitung sowie auf die Verteilung und den Standort des Produkts oder der Dienstleistung nach Auslieferung.“ [4]

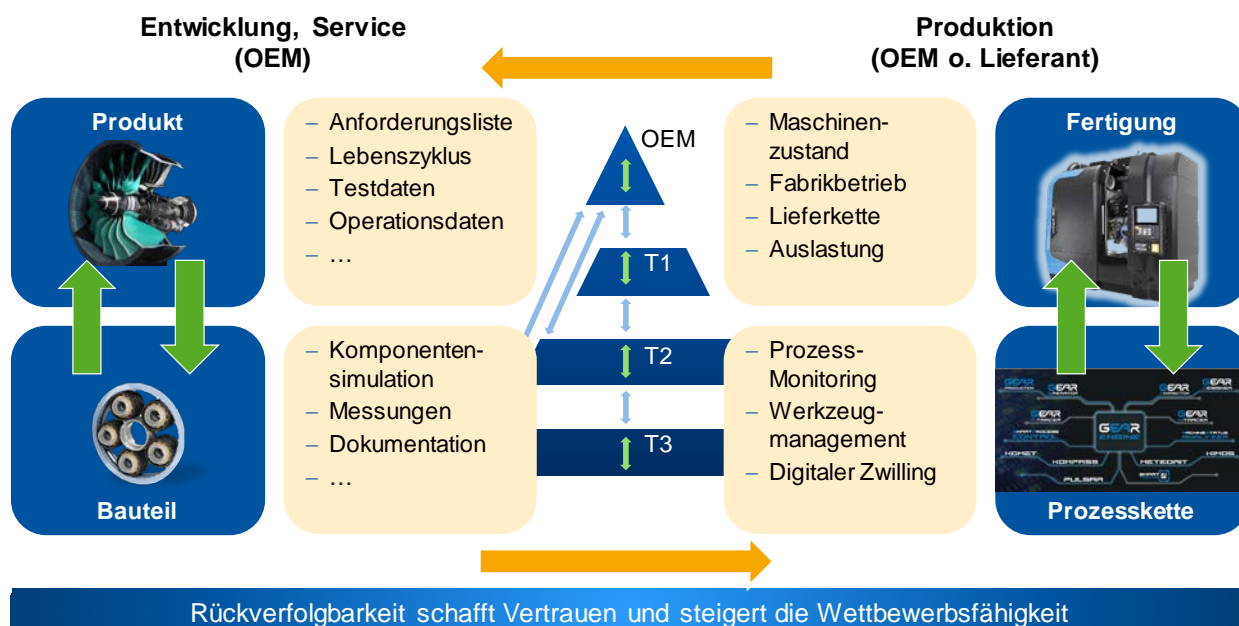
Die Rückverfolgbarkeit spielt somit eine entscheidende Rolle im Qualitätsmanagement. Denn im Falle eines Qualitätsproblems muss der Hersteller in der Lage sein, umgehend die Ursache zu identifizieren und wirksame Maßnahmen zu dessen Behebung zu ergreifen. Eine zu langsame oder unzureichende Antwort erzeugt Misstrauen bei Kunden oder Geschäftspartnern und ist somit schädlich für das Unternehmen [3]. Um die Rückverfolgbarkeit sicherzustellen, stellt die ISO 9001 Mindestanforderungen an die Produktkennzeichnung: Erstens müssen Produkte mit geeigneten Mitteln eindeutig gekennzeichnet werden. In der Produktionstechnik kommen hierfür insbesondere 2D-Darstellungsformate, beispielsweise Data Matrix Codes (DMC), als Identifikationssymbol zum Einsatz. Zweitens muss während der gesamten Produktion der Status der Ergebnisse in Bezug auf die Überwachungs- und Messanforderungen gekennzeichnet werden. Drittens müssen die dokumentierten Informationen aufbewahrt werden, sofern sie notwendig sind, um eine Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten. [5]

Trotz unterschiedlicher Sichtweisen, kann der Begriff der Rückverfolgbarkeit in zwei Hauptaspekte unterteilt werden: Einerseits in die Rückverfolgbarkeit der Fertigungs- und Lieferkette (externe Rückverfolgbarkeit) und andererseits in die interne Rückverfolgbarkeit.

1.1 Externe Rückverfolgbarkeit

Rückverfolgbarkeit innerhalb der Fertigungs- und Lieferkette (externe Rückverfolgbarkeit) bedeutet, dass der Verlauf von der Beschaffung von Rohstoffen und Teilen bis hin zu deren maschineller Bearbeitung, Montage, Vertrieb und Verkauf verfolgt werden kann, vgl. Bild 1. Die Hersteller können überwachen, wohin ihre Produkte geliefert wurden, während Unternehmen und Kunden verstehen können, welchen Weg die Produkte, welche sie in den Händen halten, genommen haben. Hersteller können so einfacher die Ursache herausfinden und Produkte zurückrufen, falls im Zusammenhang mit ihren Produkten unerwartete Probleme auftreten sollten. Vor allem in der Automobilindustrie wird die Rückverfolgbarkeit vorangetrieben. Sie wird in der Regel zur Vermeidung von Rückrufaktionen, zur Schadensminimierung sowie zur Sicherung des Qualitätsmanagements angewandt. Die Herausforderung besteht darin, die Daten von der Fertigung bis zur Entsorgung individuell für zehntausende Bauteile zu überprüfen und die sich im Laufe der Zeit wandeln-

den Gesetze und Richtlinien einzuhalten. Neben der Automobilindustrie haben Unternehmen von sicherheitsrelevanten Bauteilen, z.B. Luftfahrt- oder Medizintechnik, ein hohes Bedürfnis nach Rückverfolgbarkeit ihrer Bauteile. Insbesondere zertifizierte Bauteile unterliegen hohen Anforderungen an die Bauteil- und Prozess(ketten)dokumentation. Zudem schreitet die Globalisierung zügig voran, während sich der Kosten- und Terminwettbewerb in den letzten Jahren verschärft hat, weshalb die Wichtigkeit der Rückverfolgbarkeit weiter zunimmt. Es besteht ein dringender Bedarf für den Aufbau eines Verlaufsmanagementsystems aus einer globalen Perspektive, das sowohl innerhalb als auch außerhalb der Produktionsanlagen eingesetzt werden kann. [3]



Quelle: Rolls-Royce Deutschland, www.schwegler.de; klingelberg.de

Bild 1: Rückverfolgbarkeit der Fertigungs- und Lieferkette

1.2 Interne Rückverfolgbarkeit

Interne Rückverfolgbarkeit bedeutet, dass die Bewegung von Produkten in einem bestimmten, klar eingegrenzten Bereich innerhalb einer in sich geschlossenen Kette überwacht wird, wie zum Beispiel in einem einzelnen Unternehmen oder Werk. Im Vergleich zur externen Rückverfolgbarkeit findet kein Informations- und Materialaustausch oder Verantwortlichkeitswechsel über diese definierten Grenzen statt.

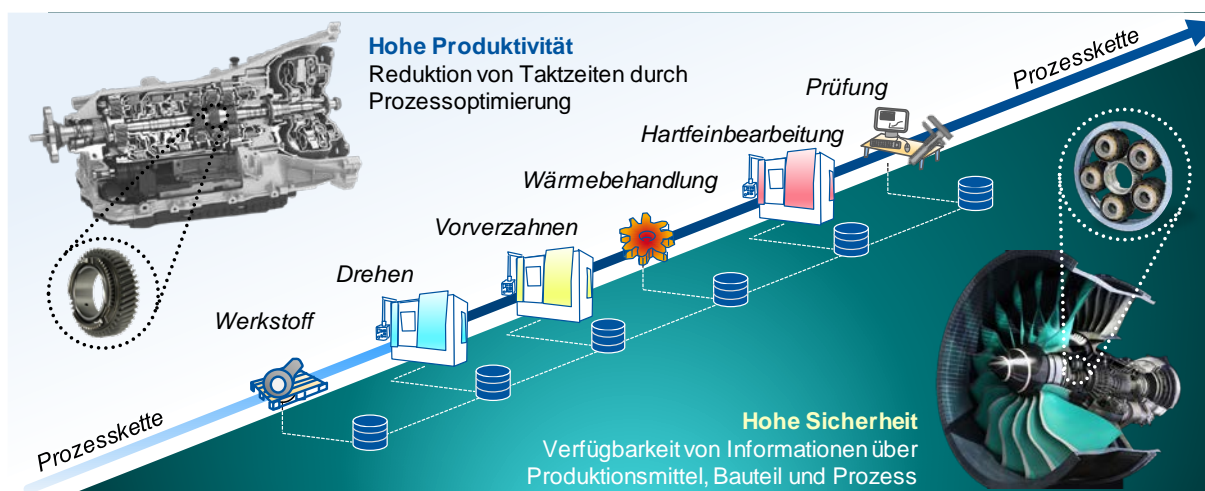
Ein Werk für Getriebemontage beschafft beispielsweise Komponenten wie Verzahnungen und Lager von Lieferanten und montiert diese. Zusätzliche notwendige Arbeitsschritte beinhalten die Verwaltung und Nutzung der Fertigungs- sowie der Prüfergebnisse der Bauteile. Hier stellt das Werk die definierte Grenze dar.

Ein weiterer Aspekt der internen Rückverfolgbarkeit ist das Teilemanagement. Hier dient die Rückverfolgbarkeit der Steuerung und dem Betrieb mehrfach verwendeter Teile wie Werkzeugen und Vorrichtungen. Zur individuellen Identifizierung werden eindeutige Seriennummern auf jedem Werkzeug angebracht, beispielsweise in Form von 2D-Codes. Auf diese Weise können Werkzeuginformationen (Name, Hersteller, usw.) verwaltet sowie Querverweise zu Fertigungsaufträgen hinterlegt werden. Weitere Informationen wie die Anzahl der Nachschleifvorgänge können inklusive Zeitstempel erfasst und verwaltet werden, um die Produktqualität zu stabilisieren.

1.3 Funktionale Rückverfolgbarkeit von Prozessketten

Die funktionale Rückverfolgbarkeit von Prozessketten ist ein Teilaspekt der Produktionstechnik und kann sowohl der internen als auch der externen Rückverfolgbarkeit zugeordnet werden. In vielen Fällen kann der Weg vom Rohteil zum einsatzfertigen Produkt mit unterschiedlichen Prozesstechnologien beschriftet werden, die sich in ihrer geometrisch-kinematischen Eignung zur Bearbeitung eines Bauteils, der erzielbaren Bauteilqualität, der Randzoneneigenschaften sowie der Wirtschaftlichkeit unterscheiden. In vielen Fällen setzt sich die Prozesskette hochbeanspruchter Bauteile aus einer Weichbearbeitung, einer Wärmebehandlung und einer abschließenden Hartbearbeitung zusammen. Ein Beispiel für eine hoch spezialisierte Prozesskette ist die Verzahnungsfertigung. [6, 7]

Je nach Branche unterscheiden sich die spezifischen Anforderungen, die an die Rückverfolgbarkeit einer Prozesskette gestellt werden, vgl. Bild 2. In der Massenproduktion (z. B. Automobilindustrie) steht die Reduktion von Taktzeiten bei gleichzeitiger Sicherstellung der Qualität und Funktionalität der Bauteile im Vordergrund. Bauteile mit hohen Anforderungen an Sicherheit - z. B. die im UltraFan™ der Firma ROLLS ROYCE eingesetzten Planetengetriebe - müssen die definierten Qualitätsanforderungen entlang der gesamten Fertigungskette nachweisbar einhalten.



Quelle: ZF Friedrichshafen, Rolls-Royce

Bild 2: Funktionale Rückverfolgbarkeit von Prozessketten

In beiden Fällen werden hohe Anforderungen an die Beherrschung der Fertigungsprozesskette hinsichtlich Verfügbarkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit (Produktivität) gestellt. Die in den einzelnen Fertigungsschritten aufgezeichneten Daten müssen zu jederzeit verfügbar sein und aktuelle Informationen über das Bauteil, die vorangegangenen Prozesse sowie die verwendeten Produktionsmittel enthalten.

Ein daten- und modellbasierter Ansatz zur Prozessgestaltung bietet hier das Potenzial, die Fertigungsprozesse effizienter zu gestalten und gleichzeitig einen höheren Informationsgehalt für die Rückverfolgbarkeit zu generieren. Beispielsweise kann durch die Verknüpfung von Spindelleistungssignalen aus der Werkzeugmaschine mit Regressionsmodellen Werkzeugverschleiß frühzeitig detektiert werden (Prozessüberwachung). So kann die Qualität des Bauteils sichergestellt werden, ohne dass der laufende Betrieb eingestellt werden muss. Gleichzeitig werden für die Rückverfolgbarkeit wertvolle Informationen über den Fräserzustand (Werkzeugverschleiß) sowie die Spindelleistung, die während der Bearbeitung des Werkstücks vorlag, generiert. Mit Methoden, wie z. B. Maschinellem

Lernen, können diese Daten weiterverwendet werden, um aus ihnen zu lernen und die Prozesse für künftige Bearbeitungsaufgaben stabiler und effizienter zu gestalten.

Die Kopplung mit Prozessmodellen erlaubt die nachhaltige Abbildung funktionaler Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und somit eine technologische Abstimmung der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich der resultierenden Bauteileigenschaften. Zur Implementierung dieses Ansatzes liegen folgende Fragestellungen vor:

- Was sind die Voraussetzungen für eine daten- und modellbasierte Prozessbeschreibung?
- Wie können die einzelnen Prozesse bestmöglich beschrieben werden und welche Daten werden hierfür benötigt?
- Wie können diese Daten intern im Unternehmen und extern zwischen Unternehmen ausgetauscht werden?
- Wo sind offene Handlungsfelder für die Implementierung von Rückverfolgbarkeitssystemen?
- Was ist der erwartete Mehrwert der Rückverfolgbarkeit für die Produktionstechnik?

2 Daten- und modellbasierte Produktion

Wirtschaftlicher Erfolg kann nur dann erzielt werden, wenn die technischen und technologischen Anforderungen an den Fertigungsprozess und die Bauteileigenschaften erfüllt werden. Daher ist es erforderlich, Modelle und Daten zu nutzen, welche die Besonderheiten unterschiedlicher Fertigungstechnologien abbilden und somit eine korrekte Prozessauswahl sowie Einstellung bzw. Kompensation einzelner Prozessschritte zur Erzielung einer gewünschten Funktionalität des Bauteils erlauben. Sogenannte Data Analytics Methoden erzeugen aus den vorliegenden Fertigungsdaten Informationen, indem mathematische Zusammenhänge (z. B. Korrelationen) zwischen Prozess- oder Bauteilparametern visualisiert werden. Durch empirisches Erfahrungswissen und Technologieverständnis der physikalischen Gesetzmäßigkeiten können Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in den analysierten Daten identifiziert werden, wodurch das reale Prozessverhalten und Schadensereignisse im Fertigungsbetrieb besser vorhergesagt und der Prozess so robuster ausgelegt werden kann, vgl. Bild 3. [6]

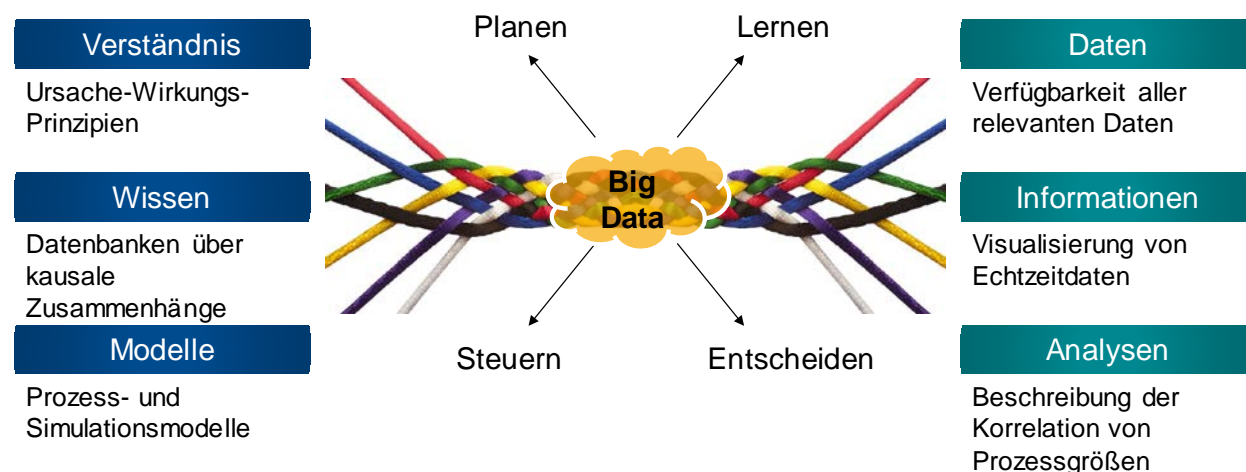


Bild 3: Verknüpfung von Technologie und Prozesswissen

2.1 Data Analytics

Der erste Schritt zur Schaffung einer datenbasierten Fertigungsoptimierung ist die Aufnahme und Speicherung aller relevanten Fertigungsdaten. Die während der Bearbeitung erzeugten Prozessgrößen, wie z.B. Verschleiß, Vibration oder Temperatur, können mittels geeigneter Sensorik gemessen und in Form von Datensätzen ausgelesen werden. Das Ziel der Weiterentwicklung der Prozessdatenaufnahme ist die Steigerung der Transparenz über die realen Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück in der Eingriffszone. Dadurch können die tatsächlichen Zusammenhänge zwischen den voreingestellten Prozessparametern und dem Bearbeitungsergebnis nachvollziehbar ausgewertet werden. Des Weiteren können bisher unbekannte Störgrößen und Einflussfaktoren identifiziert und reduziert sowie statistische Einflüsse abgebildet werden. Ebenfalls ist es durch die Datenanalyse möglich die Prozesse kontinuierlich zu überwachen.

Aus der Datenmenge lassen sich durch Data Analytics Methoden verschiedenste Korrelationen, Cluster, Klassifikationen oder Regressionen innerhalb der Daten erkennen, die anschließend als Informationen dem Nutzer bereitstehen. Innerhalb der Data Analytics Methoden existieren verschiedenen Ausbaustufen, die jeweils unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen:

- Descriptive Analytics: Ereignisse und Zusammenhänge beschreiben
- Diagnostic Analytics: Ereignisse und Zusammenhänge verstehen
- Predictive Analytics: Ereignisse vorhersagen
- Prescriptive Analytics: Ereignisse vorausplanen

In Zukunft werden sich Data Analytics Methoden als Bestandteil der Produktionsoptimierung von einer rückwirkend erklärenden hin zu einer proaktiv eingreifenden bzw. steuernden Rolle wandeln. Vielen Unternehmen stehen die zur Auswertung notwendigen Daten bereits heute zur Verfügung. Die relevanten Daten zu identifizieren und diese auch entsprechend der Zielsetzung aufzubereiten stellt die weit größere Herausforderung dar. Insbesondere der vorliegende Datensatz bestimmt häufig, wie gut die jeweilige Methode geeignet ist. Um zunächst aus den großen Datenmengen die wichtigen Informationen ableiten und darstellen zu können, müssen mittels Descriptive Analytics die Abhängigkeiten bzw. Korrelationen innerhalb der berücksichtigten Fertigungsdaten identifiziert werden. Als Ergebnis stehen dem Anwender schließlich die Zusammenhänge innerhalb der analysierten Fertigungsdaten zur Verfügung. Um die Richtigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, müssen die Anwender wiederum die Verfügbarkeit, die Verlässlichkeit sowie die Geschwindigkeit bei der Informationsgewinnung sicherstellen. Dies ist vor allem dann von höchster Bedeutung, wenn die Datenverarbeitung und Informationsbereitstellung in Echtzeit erfolgen soll. Die resultierenden Verzögerungen oder Ungenauigkeiten können zu schwerwiegenden Fehlentscheidungen führen. Aufgrund der kontinuierlich ansteigenden Komplexität von Fertigungssystemen stellen die Informationsverfügbarkeit, die Informationsreliabilität und die Informationsgeschwindigkeit wesentliche zukünftige Herausforderungen dar. [6]

Data Analytics Methoden, wie z. B. Maschinelles Lernen, brauchen, wenn sie gut funktionieren sollen, eine große Anzahl strukturierter Datensätze. Diese liegen jedoch nicht immer vor oder sind bei Bedarf abrufbar. Durch die Verknüpfung von deterministischen Modellen mit datengetriebenen Ansätzen kann die benötigte Menge an Daten reduziert und der Prozess verlässlicher gestaltet werden. Diese Methode wird als *Model-Based Data Analytics* oder *Grey-Box-Modeling* bezeichnet.

2.2 Model-Based Data Analytics

Nach STACHOWIAK sind Modelle durch drei Merkmale beschrieben: Das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal und das pragmatische Merkmal. Das Abbildungsmerkmal besagt, dass Modelle stets Repräsentationen von Originalen sind. Dabei werden nur solche Attribute des Originals erfasst, die für den jeweiligen Anwendungsfall relevant erscheinen (Verkürzungsmerkmal). Gemäß dem pragmatischen Merkmal sind Modelle ihren Originalen nicht zugeordnet, sondern erfüllen eine Ersetzungsfunktion für bestimmte Subjekte innerhalb bestimmter Zeitintervalle und für bestimmte Operationen. [8]

Mit dem Erstellen eines Modells wird demzufolge die Realität abstrahiert, weil sie meist zu komplex ist, um vollständig abgebildet zu werden. Ein Anspruch auf Vollständigkeit wird in der Regel nicht beabsichtigt. Vielmehr sollen die wesentlichen Einflussfaktoren identifiziert und dargestellt werden, die für den fokussierten Prozess und im Modellkontext bedeutsam sind.

Modelle können in White-Box-Modellen, Black-Box-Modellen oder Grey-Box-Modellen unterschieden werden (vgl. Bild 4). Die Modellierung industrieller Prozesse basiert traditionell auf der White-Box- oder Black-Box-Modellierung. Bei der White-Box-Modellierung wird das Modell unter Verwendung wissenschaftlicher Beziehungen konstruiert. Bei der Black-Box-Modellierung wird hingegen ein parametrisches Modell verwendet, das an Messdaten aus Experimenten angepasst ist. Für viele industrielle Prozesse gibt es ein gewisses, aber unvollständiges Wissen über das System. Dies impliziert, dass zwischen den White-Box- und den Black-Box-Modellen eine Grauzone besteht, die eine dritte Möglichkeit zur Erstellung von Modellen bietet. Bei diesem Ansatz wird Wissen über den Prozess verwendet und unbekannte Teile des Modells werden aus Messdaten geschätzt. Die Idee hinter der Grey-Box-Modellierung kann so formuliert werden, dass man "nicht schätzt, was man bereits weiß, sondern sein Wissen mit experimentellen Daten testet". [9]

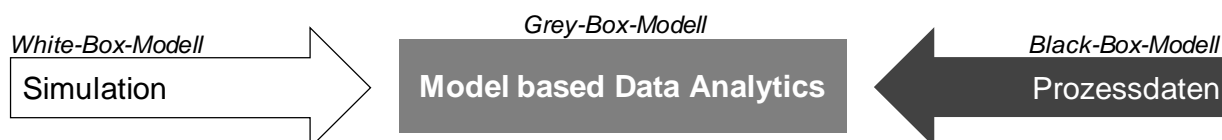


Bild 4: Grey-Box-Modellierung

Methoden wie Maschinelles Lernen verfolgen oft ausschließlich Black-Box-Ansätze, d.h. eine nichtparametrische Herangehensweise bei der es kein einfaches parametrierbares Modell gibt. Mathematische Modellierung, Simulation und Optimierung in der Industrie basieren dagegen in der Regel auf White-Box-Ansätzen, d. h. auf parametrischen Modellen. Grey-Box-Modelle kombinieren qualitatives Vorwissen mit quantitativen Daten. Dadurch kann die gesamte verfügbare Information über einen industriellen Prozess zur Bestimmung eines bestmöglichen Modells des Prozesses verwendet werden. Gegenüber Black-Box- und White-Box-Modellen haben Grey-Box-Modelle den Vorteil, Vorwissen und die Information in vorhandenen Daten zu nutzen.

2.3 Herausforderungen bei der Implementierung

Aktuelle Herausforderungen bestehen darin, die Komplexität der Datenmengen und Datenverschiedenheit zu beherrschen sowie die Datengeschwindigkeit und Datenrichtigkeit sicherzustellen. Als Analogie gleicht die Datenerfassung einem Eisberg (vgl. Bild 5). Die Spitze des Eisbergs beschreibt Daten und Informationen, die ohne großen Aufwand heute schon abrufbar und nutzbar sind (Beispielsweise das Leistungssignal in Werkzeug-

maschinen). Das große Potenzial, und damit der Mehrwert, liegt verdeckt unter der Wasseroberfläche. Um sich diese Daten bzw. Methoden zugänglich zu machen, steigt jedoch der zu betreibende Aufwand und damit direkt der Investitionsbedarf. Um Informationen über Randzoneneigenschaften zu erhalten werden in der Regel externe Sensoren benötigt. Sind die zu messenden Stellen nur schwer zugänglich, muss in der Regel eine zerstörende Prüfung durchgeführt werden. Wissenschaftliche Modelle, die eine Prädiktion der Randzonenschädigung auf Basis von Fertigungsdaten erlauben, sind heutzutage nicht Stand der Technik und müssen speziell für einen Anwendungsfall entwickelt werden. Unternehmen sehen sich demzufolge konfrontiert mit teils hohen Investitionskosten für spezifische Hardware- und Softwarelösungen bei gleichzeitiger Unsicherheit über den erzielbaren Mehrwert bei hohem Risiko. Vorab müssen daher für die Implementierung von daten- und modellbasierten Ansätzen folgende Fragen gestellt werden:

Was soll gemessen werden?

Die Frage zielt auf die zu beschreibenden Zielgrößen ab. Diese müssen einerseits funktional beschreibbar sein (z. B. Randzonenschädigung am Bauteil) und andererseits Teilprozessen und deren Key Performance Indicator (KPI) zugeordnet werden können. In Abhängigkeit von der gesuchten Zielgröße muss folgend geklärt werden, welche Daten die Zielgröße bestmöglich beschreiben und in welcher Menge bzw. Auflösung die Daten erfasst werden müssen.

Wie soll gemessen werden?

Ist die erste Frage geklärt, stellt sich die Frage, wie gemessen werden soll. Dies bezieht sich sowohl auf die Sensoren (womit messen?), als auch auf die Messmethoden (wo messen?). Der Ort der Messung kann bauteilseitig (z.B. Geometrie, Rauheit), prozessseitig (z.B. Leistungsaufnahme) oder operativ (z.B. Hilfsstoffverbrauch) erfolgen.

Wie soll ausgewertet werden?

Sind die notwendigen Daten erfasst, müssen diese in der Regel ausgewertet werden. Die Auswertung ist auch in diesem Fall nach der zu beschreibenden Zielgröße gerichtet. Eine Herausforderung bei der Auswertung stellt die Datenverarbeitung und die Wahl nach geeigneten Modellen bzw. Algorithmen dar.



The image shows an iceberg floating in the ocean. The tip of the iceberg is above the water surface, while the much larger part is submerged below. A vertical arrow on the left points downwards from the water surface, labeled 'Aufwand der Datenerfassung' (Effort of data collection) and '→ Investitionsbedarf' (Investment requirement). A small icon of a hand with a question mark is positioned near the submerged part of the iceberg. The background is a clear blue sky and ocean.

© thedrinksbusiness.com

Was soll gemessen werden?

Zielgrößen müssen...

- ...funktional beschreibbar sein
- ...Teilprozessen und deren KPIs zugeordnet werden können

Wie soll gemessen werden?

- Bauteilseitig (Geometrie, Rauheit, Oberflächenintegrität)
- Prozessseitig (Leistungsaufnahme, Prozessrandbedingungen)
- Operativ (OEE, Anlagenwartung, Hilfsstoffverbrauch)

Wie soll ausgewertet werden?

- Herausforderung: Datenverarbeitung
- Algorithmen: Korrelation vs. Kausalität

Aufwand der Datenerfassung richtet sich nach der Art und dem Umfang der benötigten Daten

Bild 5: Aufwand der Datenerfassung

Die ergebnisorientierte Vorgehensweise in produzierenden Unternehmen fokussiert in den meisten Fällen die Fragestellung nach der minimal notwendigen Datenmenge, um die benötigten Informationen zu erhalten. In diesem Zusammenhang besteht die Herausforderung darin, die relevanten Daten frühestmöglich zu identifizieren und aufzubereiten sowie unwichtige Daten aus Komplexitätsgründen zu vernachlässigen. Im Rahmen von Kooperationen aus Industrie und Forschung müssen daher zweckmäßige Strategien zur Extrapolation auf Basis kleiner Datenmengen gefunden werden. Die durchgeführten Analysen über die aufgenommenen Fertigungsdaten basieren in der Regel auf Algorithmen, die lediglich numerische Werte vergleichen und berechnen. Innerhalb dieser Vorgehensweisen werden reale physikalische Wechselwirkungen nicht berücksichtigt bzw. sind derzeit nicht ausreichend in die mathematischen Algorithmen integrierbar. Die visualisierten Zusammenhänge der Prozessdaten sind daher zunächst als reine mathematische Korrelationen zu verstehen. Einzig das Technologieverständnis des Menschen kann aus korrelierenden Daten und Informationen das Wissen über reale Ursache-Wirkungs-Prinzipien generieren. Daher müssen die datenbasierten Zusammenhänge dem Anwender zur Verfügung gestellt werden, damit dieser durch Erfahrungs- und Technologiewissen sowie durch Unterstützung von empirischen Prozessmodellen über einen kausalen Zusammenhang in den Datenkorrelationen entscheiden kann. [6]

3 Digitaler Zwilling in der Zahnradfertigung

Die Leistung eines Zahnrads ist das Ergebnis aller Schritte der Prozesskette vom Getriebeentwurf bis zur Herstellung und Montage des Zahnrads. Da alle Produktionsprozesse direkten Einfluss auf die Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit des Zahnrades haben, bietet die Modellierung und Überwachung von Zahnradfertigungsprozessen ein hohes Potenzial zur Vermeidung von Ausschussteilen und Ausfällen im Betrieb. Darüber hinaus kann durch eine verbesserte Vorhersagbarkeit der resultierenden Verzahnungseigenschaften vor und während der Herstellung die Notwendigkeit kosten- und zeitintensiver Tests des Einsatzverhaltens reduziert werden. Zudem kann durch eine daten- und modellbasierte Auslegung der Einzelprozess sowie die komplette Prozesskette entscheidend optimiert werden.

In der industriellen Praxis werden bereits unterschiedliche Konzepte einer daten- und modellbasierte Prozessgestaltung verfolgt: Zur Datenerfassung zeichnen beispielsweise Kegelradfräsmaschinen der Firma KLINGELNBERG die Spindellast hochauflösend auf, während beim Automobilhersteller DAIMLER das Wälzschälen von Verzahnungen durch einen in die Werkzeugmaschine integrierten Schwingungssensor überwacht wird. Durch eine Kombination der erfassten Daten mit Modellen kann der Prozess entscheidend optimiert werden. Kritischen Prozessgrößen (Lastspitzen oder erhöhte Schwingungssignale) können vermieden und so eine Steigerung der Werkzeugstandzeit bei einer reduzierten Bearbeitungszeit und konstanter Oberflächenqualität erzielt werden.

Im wissenschaftlichen Umfeld wird am WZL der RWTH in Aachen an dem *Digitalen Zwilling* für die vollständige Rückverfolgbarkeit von Prozessketten für die Verzahnungsfertigung geforscht (vgl. Bild 6). Bei diesem Konzept wird zunächst ein digitaler Schatten des Werkstücks erzeugt, der sich mit der physikalischen Komponente entlang der Prozesskette entwickelt. Der angestrebte digitale Schatten besteht zum einen aus modernen Simulationsmodellen, welche bei der Auslegung und Analyse des Designs, der Fertigungsschritte und -kette sowie dem Einsatzverhalten unterstützen. Zum anderen enthält der digitale Schatten physikalische Prozessdaten, die während des Bearbeitungsprozesses

aus der Maschinensteuerung und den Messgeräten gewonnen und in eine intelligente Datenbank integriert werden.

Die Kombination von Prozess- und Simulationsdaten liefert neue Ansätze für die adaptive Prozesssteuerung im Hinblick auf die Teilefunktionalität und für die Analyse neuer Ursache-Wirkungs-Abhängigkeiten, die durch bestehende Modelle aktuell nicht abgedeckt werden. Auf diese Weise kann der digitale Schatten die Zahnradproduktion in verschiedenen Aspekten unterstützen. Als Beispiel kann die im digitalen Schatten enthaltene Soll-Größe mit einer Ist-Größe verglichen und durch Echtzeit-Prozessdaten dargestellt werden. Auf diese Weise können unzulässige Prozessbedingungen während des Prozesses erkannt, korrigiert und somit Ausschussteile aufgrund von Komponentenfehlern vermieden werden. Sollten dennoch Ausschussteile oder Ausfälle auftreten, kann der digitale Schatten durch die enthaltenen Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu einer erfolgreichen Ursachenermittlung beitragen. Auf diese Weise kann das wiederholte Auftreten von Fehlern vermieden und die Stabilität der Produktion optimiert werden.

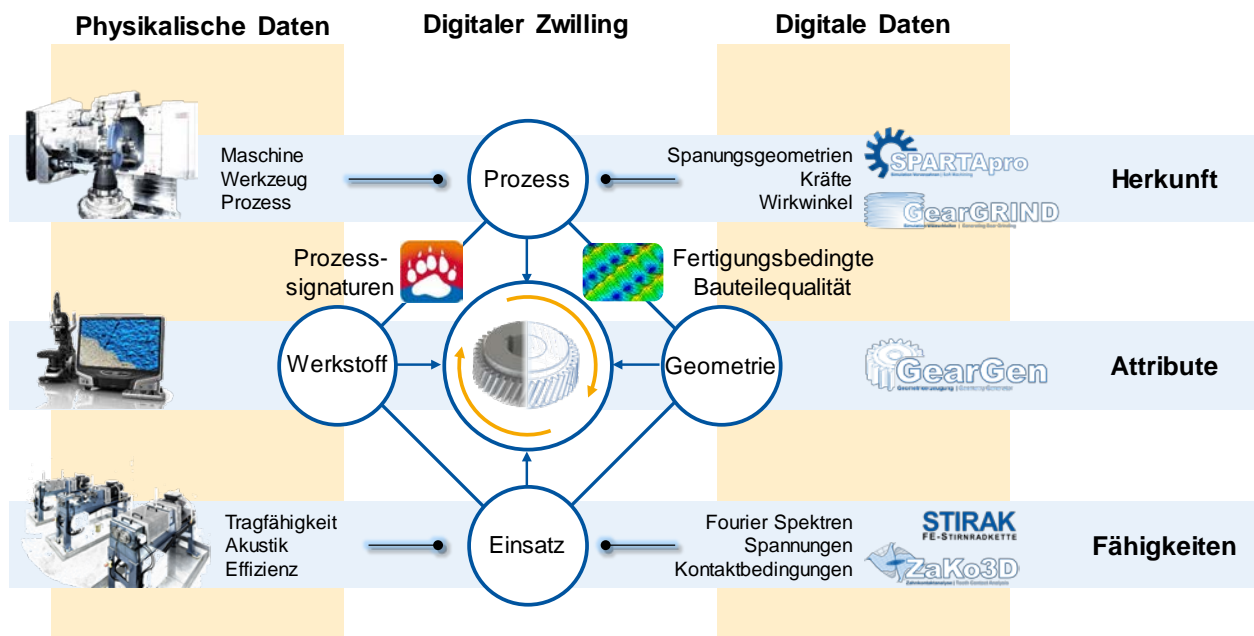


Bild 6: Digitaler Zwilling in der Zahnradfertigung

Grundlage für ein exaktes Modell der gesamten Fertigungskette innerhalb des digitalen Schattens ist die Kenntnis des Einflusses jedes Produktionsschrittes auf die Verzahnungseigenschaften. Als Teil des digitalen Schattens wird die Modellierung der resultierenden Verzahnungseigenschaften einschließlich der Abweichungen derzeit in Fertigungssimulationen implementiert. Die Simulation von Herstellungsabweichungen ermöglicht eine virtuelle Messung und kann als Eingangsgröße für eine realistische virtuelle Zahnkontaktanalyse verwendet werden.

Für das diskontinuierliche Profilschleifen wurde eine Fertigungssimulation entwickelt, die auf dem Grundprinzip der freien Kinematiken beruht. Mit dieser Methode können beliebige Achsbewegungen der Werkzeugmaschine abgebildet werden. Die im Fertigungsprozess aufgezeichneten Servo-Traces der Maschinenachsen bilden die Grundlage der Simulation. Durch einen parallel ablaufenden Durchdringungsalgorithmus kann zunächst das kinematische Werkzeugprofil beim Abrichten numerisch berechnet werden. Mit dem abgerichteten Profil wird anschließend der Schleifvorgang auf Basis der realen Maschinenbewegungen durchgeführt. So können die kinematischen Abweichungen des ge-

schliffenen Zahnrades auf Basis realer Achsbewegung und des abgerichteten Profils ermittelt werden. Auf diese Weise kann die Auswirkung von Achsabweichungen oder prozessbedingten charakteristischen Achsbewegungen auf die Verzahnungsqualität nahezu in Echtzeit vorhergesagt werden.

Die Modellierung der Prozesskinematik wurde validiert, indem die während eines Profilschleifprozesses erfassten Maschinenachspalten in die Simulation übertragen wurden. Dabei konnte eine gute Übereinstimmung der vorhergesagten Bauteilabweichungen mit den tatsächlich gemessenen Bauteilabweichungen festgestellt werden, vgl. Bild 7. Die entwickelte Simulationsmethode bietet daher ein verbessertes Verständnis des Einflusses von Prozessabweichungen auf die Verzahnungsqualität. Darüber hinaus ermöglicht die Methode eine virtuelle Messung geschliffener Zahnräder und damit eine Reduzierung der realen Messzeit. [10]

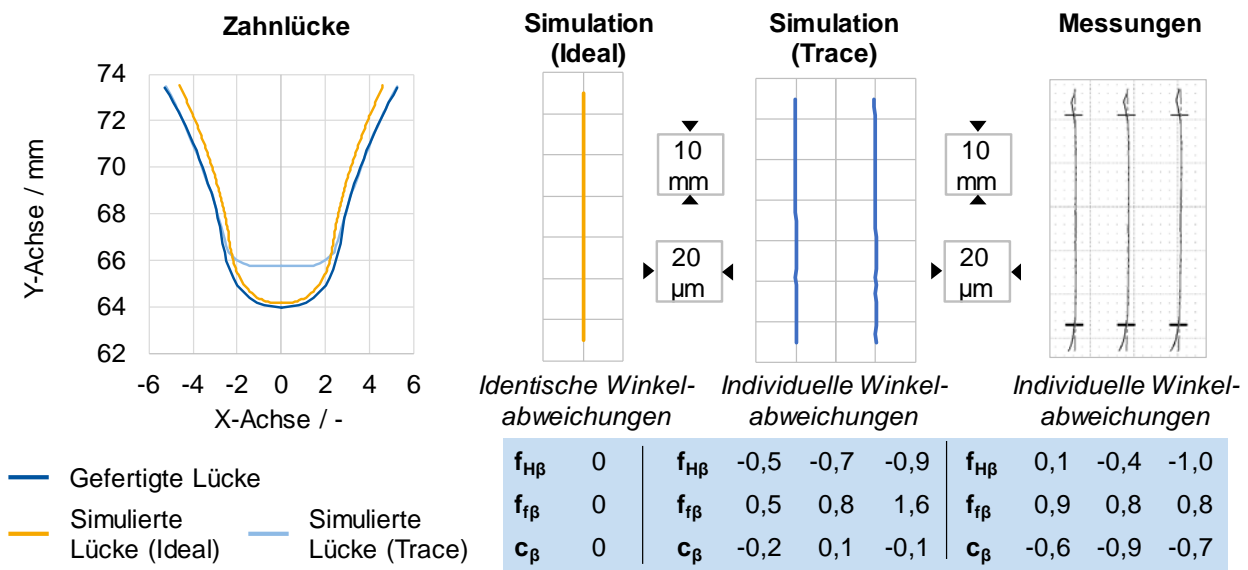


Bild 7: Vergleich simulierter und gemessener Zahnlückenprofile

Liegen für jeden Einzelprozess daten- und modellbasierte Methoden vor, können diese in einen Qualitätsregelkreis integriert werden, um Messintervalle durch simulationsgestützte Qualitätsvorhersage zu reduzieren, vgl. Bild 8. Eine Visualisierung der Analyseergebnisse auf Endgeräten (Werkstück- oder Losspezifisch) ermöglicht dem Maschinenbediener die kontinuierliche Qualitätskontrolle. Die in den Einzelprozessen aufgezeichneten Daten und Informationen können durch den Digitalen Zwilling an den nachfolgenden Prozess weitergegeben werden, wo sie als Eingangsinformationen für Simulation und Prozess genutzt werden können.

Auch die Fertigungsauslegung profitiert durch den Zugriff auf den Daten und Analysen vorangegangener Fertigungsoperationen. KI-Algorithmen können aus historischen Daten schöpfen und Zusammenhänge zwischen Werkstoff, Werkzeug, Prozessparametern, Prozessgrößen (Kräfte, Verschleiß, Temperatur...) sowie der resultierenden Oberflächentopographie und -integrität erkennen. Auf Basis dieser Analyse können gezielt auf die Prozesse abgestimmte Prozessparameter abgeleitet und kontinuierlich optimiert werden.

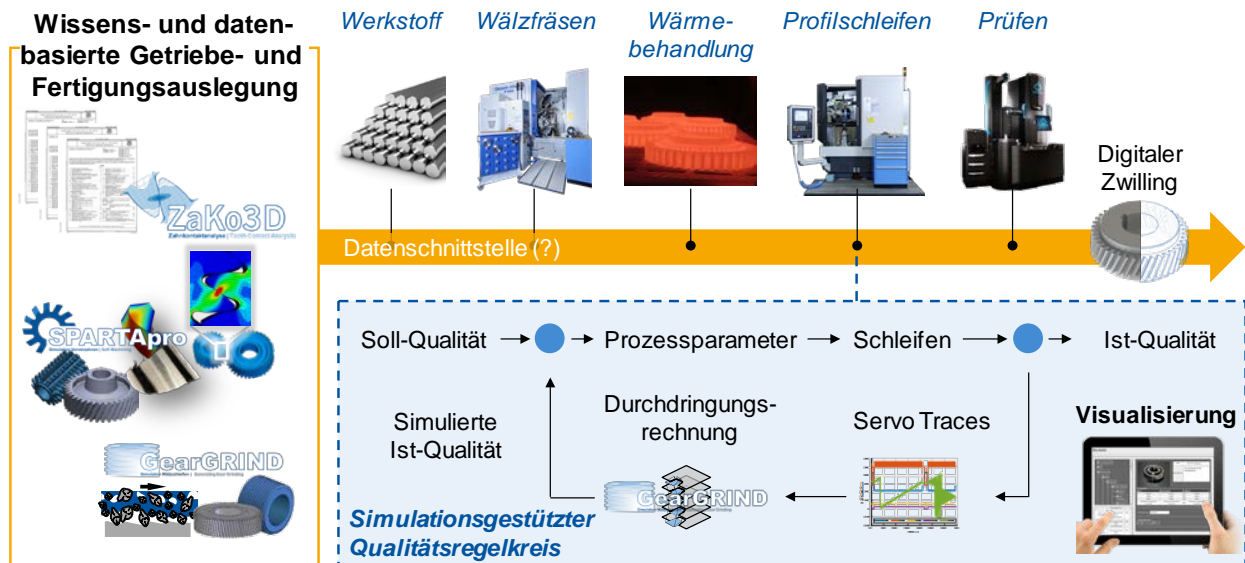


Bild 8: Digitaler Zwilling als Enabler für Rückverfolgbarkeit und Prognosefähigkeit

4 Datenschnittstelle

Eine wesentliche Anforderung für die Realisierung des Digitalen Zwillings und der funktionalen Rückverfolgbarkeit ist die Schaffung einheitlicher Schnittstellen. Zwischen den einzelnen Prozessschritten sowie Messmitteln ist ein effizienter und automatisierter Datenaustausch erforderlich. Dies ist insbesondere für heterogene Fertigungsstraßen mit Maschinen unterschiedlicher Hersteller von Bedeutung. Dazu bedarf es der Umsetzung allgemein akzeptierter Austauschformate.

In der Verzahnungstechnik bietet das durch den VDI/VDE Fachausschuss „Messen an Zahnräder und Getrieben“ definierte Datenaustauschformat *Gear Data Exchange* (GDE, VDI 2610) einen Standard zum Übertragen von verzahnungsrelevanten Daten an. Das Format basiert auf der *Extensible Markup Language*, kurz *XML*. Die XML-Sprache ist eine Auszeichnungssprache, die sowohl von Menschen als auch von Maschinen gelesen werden kann. Die Sprache wird zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten verwendet und ist flexibel erweiterbar. Jede Datei besteht aus mindestens einer Datenstruktur *gear_data* (*Verzahnungsdaten*). Zusätzlich können Mess- und Auswertungsdaten eines Bearbeitungszustandes berücksichtigt werden. [11]

Die Firma ZF FRIEDRICHSHAFEN nutzt dieses Format beispielsweise zur internen Produkt- und Fertigungsplanung sowie Erfassung von Produktions- und Messdaten. Neben der Nutzung als internes Austauschformat kann GDE auch als externes Austauschformat zwischen Unternehmen fungieren, beispielsweise zur digitalen Werkzeugbeschaffung. [12]

Eine weitere Möglichkeit der Datenspeicherung und des -austausches bieten Product-Lifecycle-Management bzw. Produktlebenszyklusmanagement (PLM) Systeme. PLM ist ein Konzept zur nahtlosen Integration sämtlicher Informationen, die im Verlauf des Lebenszyklus eines Produktes anfallen. Das Konzept beruht auf abgestimmten Methoden, Prozessen und Organisationsstrukturen und bedient sich üblicherweise IT-Systemen für die Aufzeichnung und Verwaltung der Daten. [13]

Als Hersteller für Hochleistungspräzisionswälzlager aus hochfesten Lagerwerkstoffen (z. B. ASP 2030, Pyrowear 53) für die Motorsport- und Luftfahrtindustrie nutzt die Firma CEROBEAR zur Speicherung relevanter Daten und deren Austausch mit Zulieferern und

Kunden ein solches System. Entlang der Prozesskette wird eine mit dem PLM System verknüpfte Datenbank kontinuierlich mit Daten angereichert. Durch die direkte Verknüpfung kann der Echtzeitstatus von Maschine und Bauteil jederzeit und überall abgerufen werden. Kunden und Zulieferern kann ein individueller Zugriff auf das System gewährt werden, sodass auch sie bedarfsgerecht Daten und Informationen abrufen können. Auf diese Weise wird die Rückverfolgbarkeit nicht nur firmenintern, sondern auch über die Unternehmensgrenzen hinaus ermöglicht. Dies steigert das Vertrauen des Kunden in die zugelieferten Produkte und somit die Wettbewerbsfähigkeit des Zulieferers.

5 Vision - (Traum)fabrik der Zukunft

In der (Traum)fabrik der Zukunft sind alle Barrieren überwunden und eine vollständige Datensicherheit sichergestellt (s. Bild 9). Kunde und Zulieferer haben durch ein gemeinsames Rückverfolgbarkeitssystem jederzeit und überall Einsicht in die für sie relevanten Produkteigenschaften und –informationen. Eine über alle Fertigungsinstanzen reichende Vernetzung ist realisiert, die die Datenakquisition, -speicherung, -verarbeitung und –nutzung in einer internen Unternehmens-Cloud-Umgebung (on premise) sicherstellt. Werkzeug- und Messmaschinen sind direkt verbunden und können in Echtzeit relevante Daten übertragen. Die Verwendung von Realdaten kombiniert mit Technologiemoellen ermöglicht die Prognosefähigkeit von Prozessen, Prozessketten und Bauteilqualitäten. Durch diese modell- und datenbasierte Prozessgestaltung und –überwachung wird eine konstante Qualität der Bauteile bei minimalem Ressourcenverbrauch und maximaler Produktivität sichergestellt. Über den Digitalen Zwilling als virtuelles Detailabbild der Komponente wird eine beschleunigte Produkt- und Prozessentwicklung sowie eine autonome Steuerung von Prozessen und Prozessketten ermöglicht. Dadurch wird die Anpassungsfähigkeit einer Produktion deutlich verbessert. Mitarbeiter werden durch Visualisierungssysteme befähigt, Entscheidungen schneller und wissensbasierter treffen zu treffen. [14]

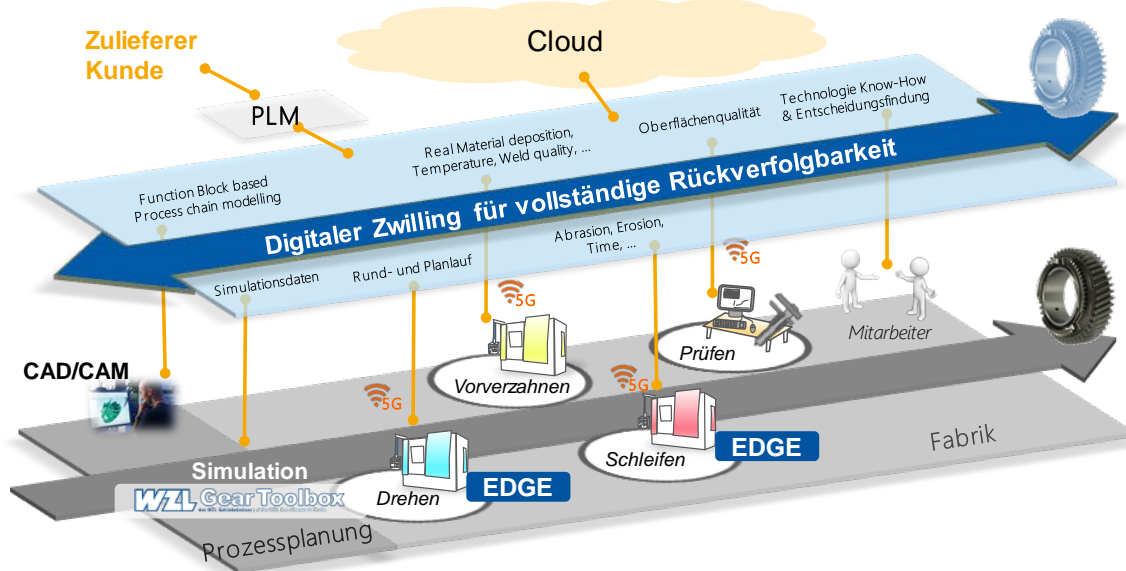


Bild 9: Produktion der Zukunft [14]

6 Fazit und Ausblick

Die Sicherstellung der Bauteilfunktionalität ist ein entscheidendes Qualitätskriterium. Die in den einzelnen Fertigungsschritten aufgezeichneten Daten müssen zu jederzeit verfügbar sein und aktuelle Informationen über das Bauteil, die vorangegangenen Prozesse sowie die verwendeten Produktionsmittel enthalten. Denn im Falle eines Qualitätsproblems muss der Hersteller in der Lage sein, umgehend die Fehlerursache zu identifizieren und wirksame Maßnahmen zu dessen Behebung zu ergreifen. Der Rückverfolgbarkeit kommt somit eine entscheidende Rolle zu. Durch modell- und datenbasierte Ansätze können Fertigungsprozesse so gestaltet werden, dass sie effizienter arbeiten und gleichzeitig einen höheren Informationsgehalt für die Rückverfolgbarkeit generieren. Eine Kopplung mit Prozessmodellen erlaubt die nachhaltige Abbildung funktionaler Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und somit eine technologische Abstimmung der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich der resultierenden Bauteileigenschaften. Ziel ist es, die Funktionalität des Bauteils sicherzustellen, ohne dass der laufende Betrieb eingestellt wird.

In komplexen Prozessketten (z. B. Verzahnungsfertigung) besteht die Anforderung, dass die einzelnen Prozessschritte zur Erfüllung der Bauteilanforderungen optimal aufeinander abgestimmt werden müssen. Im Detail unterschieden die sich daraus ergebenden Herausforderungen zwischen den Anwendungsfällen. Generell werden hohe Anforderungen hinsichtlich Verfügbarkeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit (Produktivität) gestellt. Vor diesem Hintergrund wurden verschiedene Aspekte einer modell- und datenbasierten Prozessgestaltung betrachtet. Es wurde gezeigt, dass die Datenerhebung zielgrößenorientiert sein muss und nur in dem Umfang erfolgen sollte, der tatsächlich sinnvoll ist. In einem nächsten Schritt müssen diese Daten wissensbasiert ausgewertet werden. Erst durch die Vernetzung der Informationen aus der Fertigung, insbesondere durch die Einbeziehung des Mitarbeiters, entsteht die Basis, um Prozessketten hinsichtlich der resultierenden Bauteilfunktionalität zu optimieren.

Zur Realisierung einer vollständigen Rückverfolgbarkeit der gesamten Prozesskette ist die Analyse eines Einzelprozesses jedoch nicht ausreichend. Eine wesentliche Weiterentwicklung stellt das Konzept des Digitalen Zwillings auf Prozesskettenebene dar. Als Basis werden die individuellen Prozessschritte daten- und modellbasiert beschrieben. Die strukturierte Speicherung und Auswertung der generierten Daten erlaubt es für neue Anwendungsfälle, die Prozesseinrichtung durch Selbstlernstrategien zu verkürzen. Für die Umsetzung des Digitalen Zwillings und der funktionalen Rückverfolgbarkeit ist die Schaffung einheitlicher Schnittstellen zwingend erforderlich. Zwischen den einzelnen Prozessschritten sowie Messmitteln ist ein effizienter und automatisierter Datenaustausch notwendig. Dies ist insbesondere für heterogene Fertigungsstraßen mit Maschinen unterschiedlicher Hersteller von Bedeutung. Dazu bedarf es der Umsetzung allgemein akzeptierter Austauschformate.

Als Resultat entsteht ein modernes Produktionsumfeld, in dem eine vollständige Rückverfolgbarkeit und Prognosefähigkeit von Prozessen und Prozessketten gegeben ist. Durch ein gemeinsames Austauschsystem haben Kunden und Zulieferer jederzeit und überall Einsicht in die für sie relevanten Produkteigenschaften und –informationen. Mitarbeiter werden durch Visualisierungssysteme befähigt, Entscheidungen schneller und wissensbasierter treffen zu treffen.

Literatur

- [1] Cleland-Huang, J.; Gotel, O.; Zisman, A.: Software and Systems Traceability. London: Springer, 2012.
- [2] Gotel, O.; Finkelstein, A.: An Analysis of the Requirements Traceability Problem. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Requirements Engineering. Colorado Springs, CO, USA, 18.-22. April 1994. Los Alamitos, CA, USA: IEEE, 1994, S. 94–101.
- [3] Keyence Corporation: Leitfaden zur Rückverfolgbarkeit. Neu-Isenburg, 2017.
- [4] DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Berlin, 2015.
- [5] DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen. Berlin, 2015.
- [6] Klocke, F.; Arntz, K.; Dröscher, T.; Gorgels, C.; Heuer, V.; Johann, H.; Kappmeyer, G.; Krömer, M.; Löpenhaus, C.; Schug, P.; Welling, D.: Prognosefähigkeit für Prozessketten. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): AWK Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium 2017. Internet of Production für agile Unternehmen. Aachen, 18.-19. Mai 2017. Aachen: Apprimus, 2017, S. 435–493.
- [7] Klocke, F.; Brecher, C.: Zahnrad- und Getriebetechnik. Auslegung - Herstellung - Untersuchung - Simulation. München: Hanser, 2017.
- [8] Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer, 1973.
- [9] Sohlberg, B.; Jacobsen, E. W.: Grey Box Modelling - Branches and Experiences. In: IFAC (Hrsg.): Proceedings of the 17th World Congress of The International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, 06.-11. Juli 2008. Amsterdam: Elsevier, 2008, S. 11415–11420.
- [10] Bergs, T.: Digital Twin in Gear Manufacturing Processes. In: Bergs, T.; Brecher, C. (Hrsg.): 8th WZL Gear Conference in the USA. Westminster, CO, USA, 23.-24. Juni 2019. Aachen: Apprimus, 2019, S. 2-1 - 2-12.
- [11] VDI/VDE 2610: Format für den Austausch von Verzahnungsdaten Gear-Data-Exchange-Format (GDE-Format). Berlin, 2014.
- [12] Yakaria, H.: Gear Data Exchange (GDE) - goLive. In: VDI (Hrsg.): International Conference on Gears 2017. Garching, 13. - 15. September 2017. Düsseldorf: VDI, 2017, S. 1235–1246.
- [13] Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management. Berlin: Springer, 2009.
- [14] Klocke, F.; Bergs, T.; Bobek, T.; Huwer, T.; Liu, G.; Pothen, M.; Staatsmeyer, J.-H.; Winands, K.: Vernetzte adaptive Produktion. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): AWK Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium 2017. Internet of Production für agile Unternehmen. Aachen, 18.-19. Mai 2017. Aachen: Apprimus, 2017, S. 263-286.

Danksagung

Das WZL dankt den Mitautoren für die Bereitstellung der Inhalte und Beispiele aus den jeweiligen Unternehmen zur Erstellung des vorliegenden Berichts.

Mitarbeiter der Arbeitsgruppe für den Beitrag 3.1:

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

Jens Brimmers, WZL, RWTH Aachen

Dr.-Ing. Gregor Kappmeyer, Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, Oberusel

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Christoph Löpenhaus, Cerobear GmbH, Herzogenrath

Dr.-Ing. Florian Scheffler, Klingelberg AG, Hückeswagen

Dr.-Ing. Ulrich Thies, Daimler AG, Stuttgart

Nico Troß, WZL der RWTH Aachen

Jens Wemhöner, Cerobear GmbH, Herzogenrath

Dr.-Ing. Hermann Yakaria, ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen