

2.1 Fertigung für eine Kreislaufwirtschaft

T. Bergs, J. Brimmers

Gliederung

1	Einleitung	128
2	Fertigung in der Kreislaufwirtschaft	129
2.1	Einordnung.....	129
2.2	Der digitale Zwilling als Befähiger für die erfolgreiche Implementierung der Kreislaufwirtschaft.....	135
2.3	Aktuelle Herausforderungen für die Umsetzung.....	138
3	Perspektiven für die Fertigung in einer nachhaltigen Wirtschaft.....	139
3.1	Beispiele und Perspektiven für die nachhaltige Produktion.....	140
3.2	Beispiele und Perspektiven für die Produktion nachhaltiger Produkte	144
3.3	Vision	147
4	Zusammenfassung.....	148
5	Literatur.....	149

Kurzfassung

Fertigung für eine Kreislaufwirtschaft

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

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

Abstract

Manufacturing for a Circular Economy

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

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

1 Einleitung

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



Abbildung 1: Sustainable Development Goals der United Nations

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

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

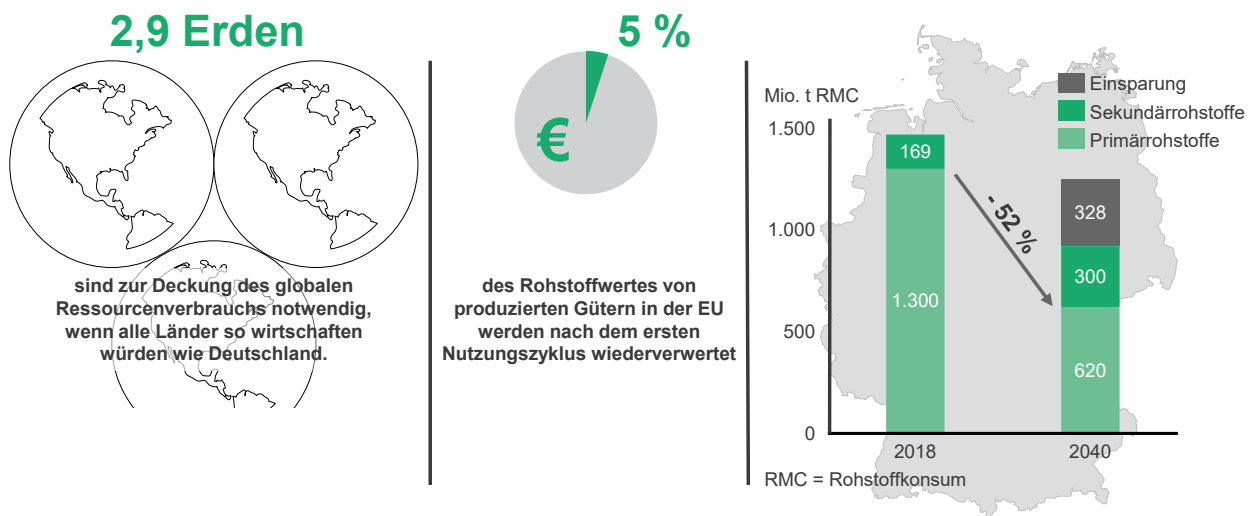


Abbildung 2: Der hohe Ressourcenverbrauch erfordert ein Umdenken der Industrie

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

2 Fertigung in der Kreislaufwirtschaft

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

2.1 Einordnung

Produktlebenszyklus

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

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

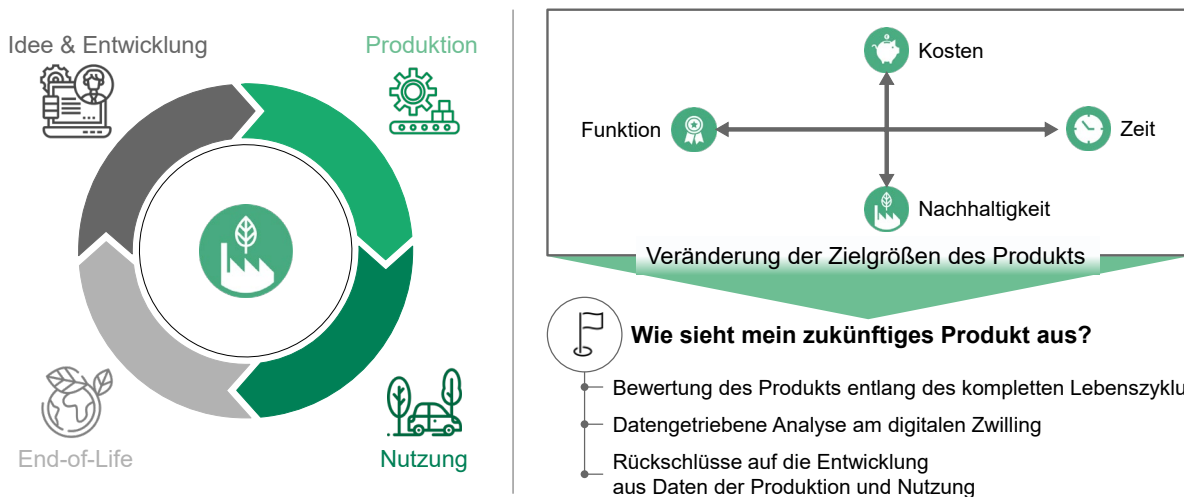


Abbildung 3: Produktlebenszyklus und veränderte Zielgrößen für die Produktentwicklung, -produktion und -nutzung

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

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

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

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

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

Kreislaufwirtschaft

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

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

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

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

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

Klassen	R-Szenarien	Umsetzung
Innovative Produkte & Prozesse	R0 Refuse	Produkt obsolet machen oder radikal überdenken
	R1 Rethink	Produktnutzung erhöhen und überdenken (z.B. Sharing)
	R2 Reduce	Ressourceneinsatz im Produkt oder Produktion senken, Effizienz steigern
Verlängerung der Produktlebensdauer	R3 Reuse	Weiternutzung durch Dritte ohne Anpassung des Produktes
	R4 Repair	Reparatur und Wiederherstellung der eigentlichen Produktfunktion
	R5 Refurbish	Reparatur und Update eines Produktes
	R6 Remanufacture	Nutzung von Teilen aus defekten Produkten in einem neuen Produkt mit gleicher Funktion
Materialnutzung	R7 Repurpose	Nutzung von Teilen aus defekten Produkten in einem neuen Produkt mit anderen Funktionen
	R8 Recycle	Weiterverarbeitung der Materialien in gleicher oder niedrigerer Qualität
	R9 Recover	Verwertung der Materialien (z.B. thermische Verwertung zur Stromerzeugung)

Steigerung der Nachhaltigkeit

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

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

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

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

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

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

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

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

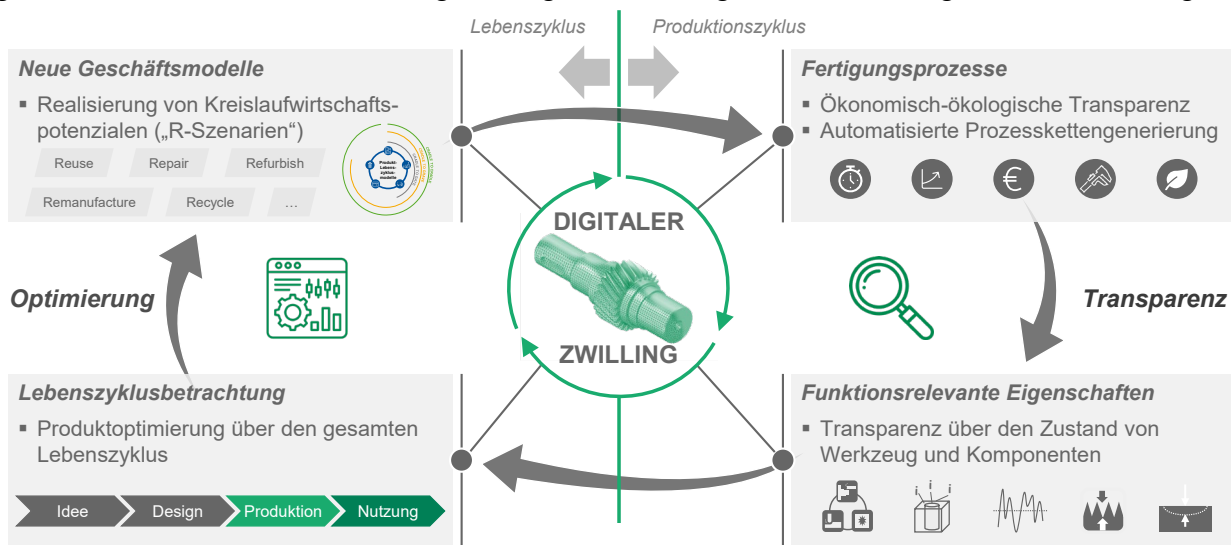


Abbildung 5: Nachhaltigkeitsansätze für produzierende Unternehmen

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

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

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

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

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

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

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

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

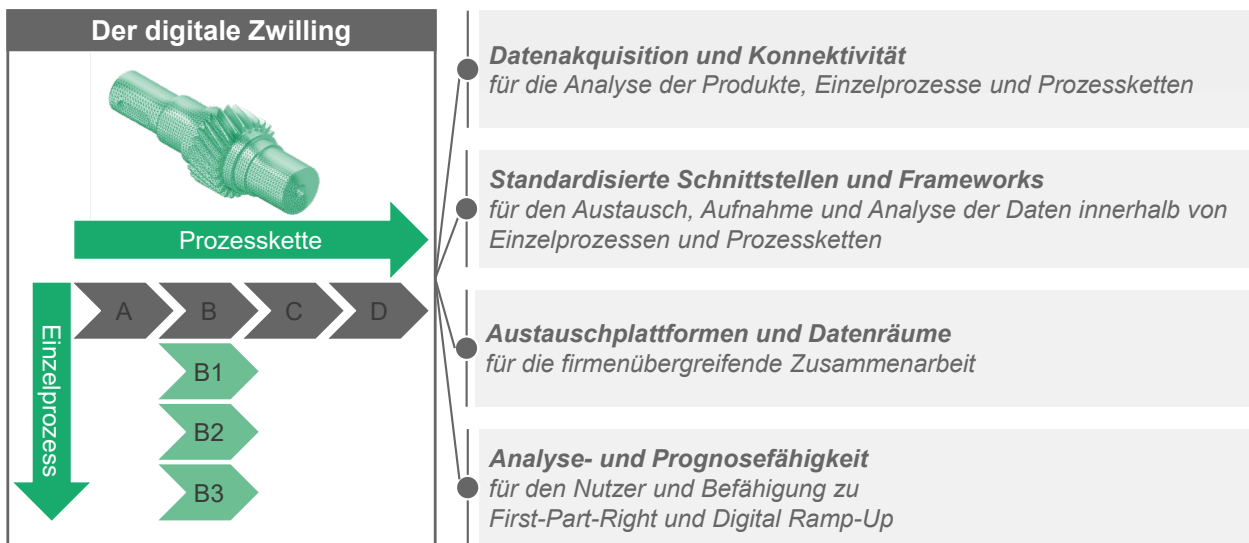


Abbildung 6: Voraussetzungen für die Umsetzung des digitalen Zwillings als Befähiger der Kreislaufwirtschaft aus Sicht der Fertigung

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.3 Aktuelle Herausforderungen für die Umsetzung

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

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

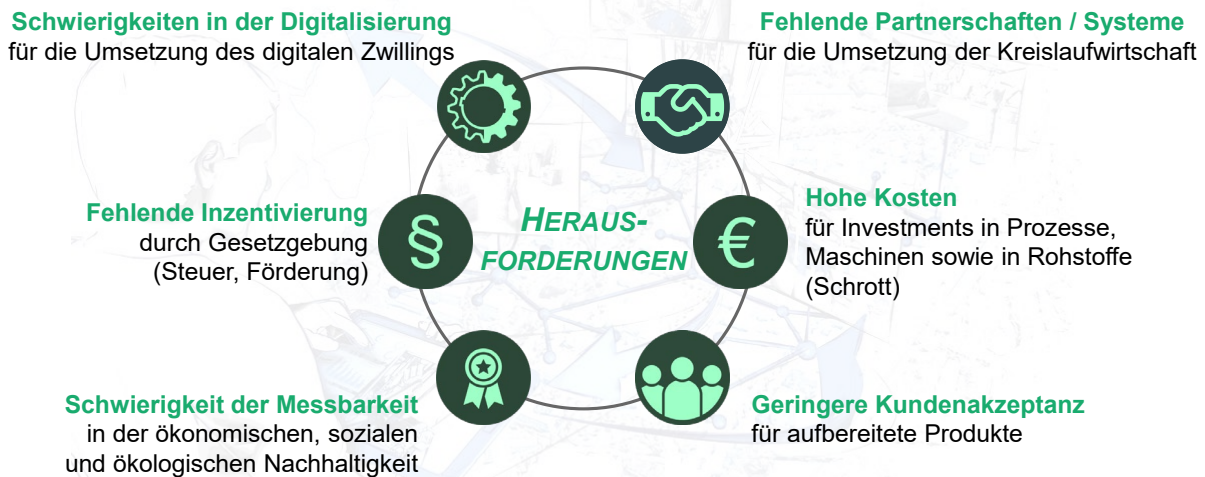


Abbildung 7: Aktuelle Herausforderungen für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in produzierenden Unternehmen

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

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

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

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

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

3 Perspektiven für die Fertigung in einer nachhaltigen Wirtschaft

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

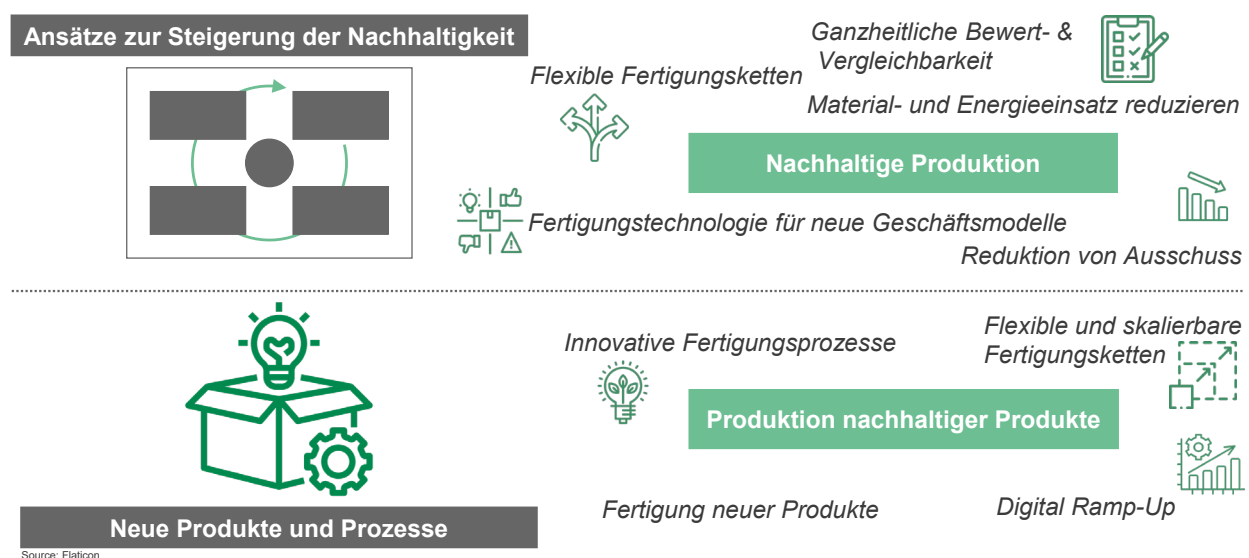


Abbildung 8: Perspektive für die Fertigung in einer nachhaltigen Wirtschaft

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

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

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

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

3.1 Beispiele und Perspektiven für die nachhaltige Produktion

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

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

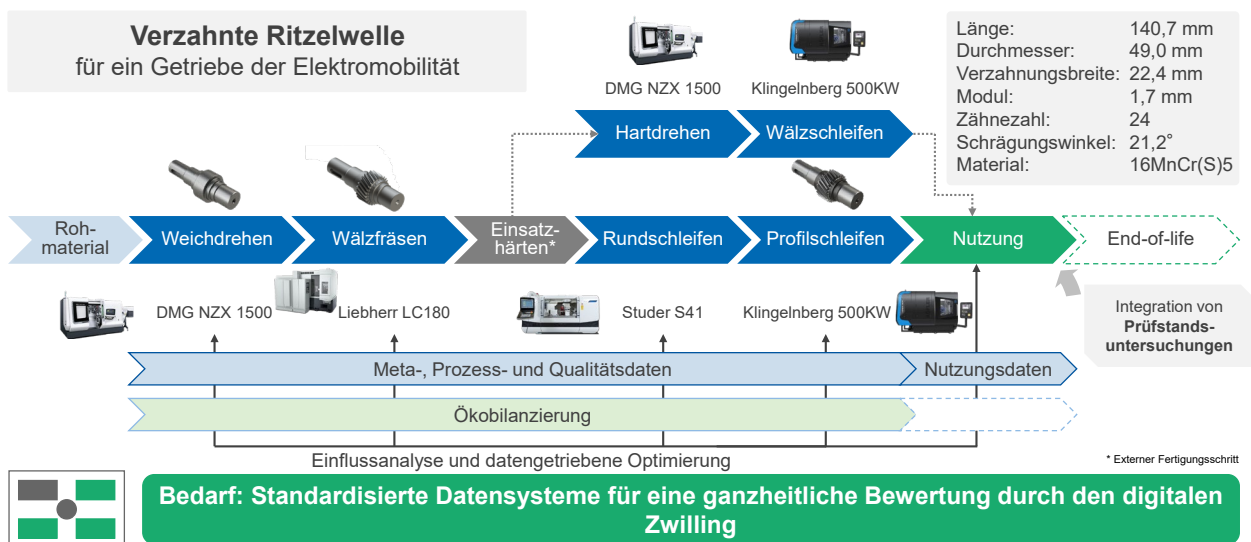


Abbildung 9: Nachhaltigkeitsbewertung von Bauteilen am Beispiel einer Verzahnung aus der Elektromobilität

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

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

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

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

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

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

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

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



Fertigungstechnologien, wie

... Laser Metal Fusion (LFM)

... Laser Metal Deposition (LDM)

bieten die Möglichkeit zur Bauteilreparatur.

+ Reparatur am Originalbauteil möglich

+ Deutliche Reduktion des Material- und Energieeinsatzes

- Festigkeit des neuen Materials ggf. reduziert



Bedarf: Effiziente Fertigungstechnologien mit hohen Materialraten zur Reparatur

Abbildung 10: Effiziente Fertigungstechnologie für die Bauteilreparatur

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

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

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

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

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

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



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

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

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

Nachdem die Prozesskette durchlaufen wurde, können die Produkte in das Fahrzeug eingebaut werden und sind im Sinne der Lebensdauer als gleichwertige Neuteile zu betrachten. In der Ökobilanzierung können für den hier vorliegenden Fall 215 kg CO₂ und 850 kWh Energie für die Aufbereitung eines Getriebes im Vergleich zur Neuproduktion eingespart werden.

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

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

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

3.2 Beispiele und Perspektiven für die Produktion nachhaltiger Produkte

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

Das erste Beispiel adressiert die Entwicklung sogenannter High-Bypass-Ratio (HBR) Triebwerke, zur Senkung des Treibstoffverbrauchs und der Lärmemissionen kommerzieller Luftfahrtantriebe (siehe Abbildung 12). Für Forschungszwecke des DLR fertigte das Fraunhofer IPT einen Titan-Fan im Maßstab 1:3¹⁾ in Integralbauweise zwecks Testung von Seitenwindinflüssen auf einem speziellen Triebwerksprüfstand. Im Anschluss an das Produktdesign umfassten die wesentlichen Prozessschritte das rechnergestützte Prozessdesign, die Dreh- und Fräsbearbeitung, sowie die abschließende Qualitätssicherung.

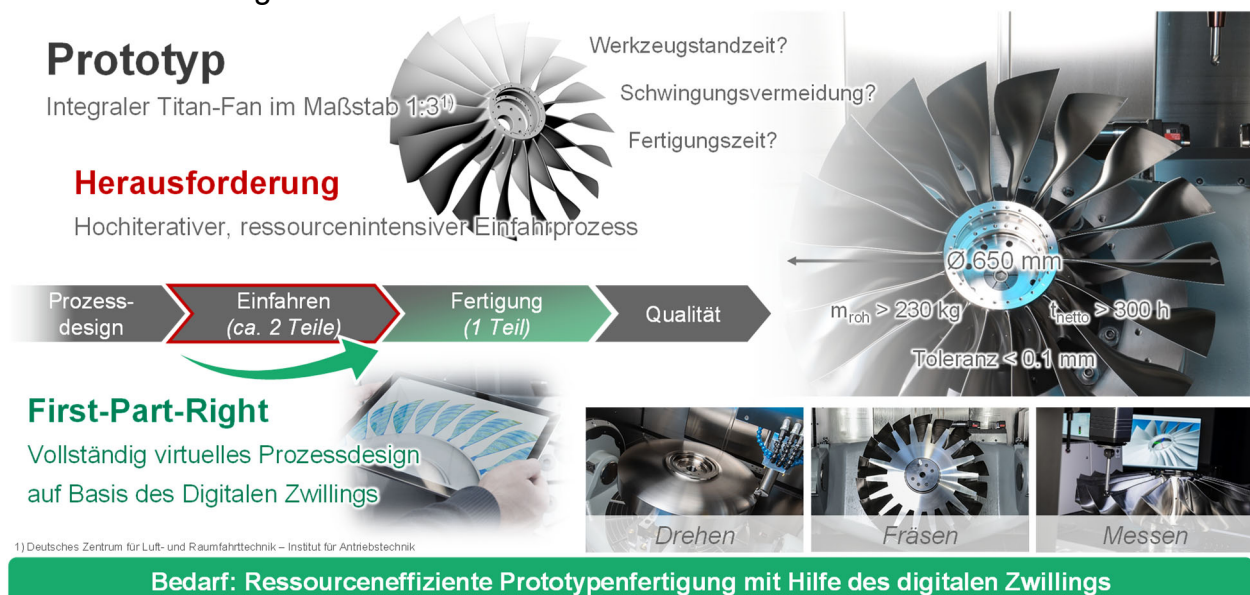


Abbildung 12: Ressourceneffiziente Prototypenfertigung für emissionsarme Luftfahrtantriebe

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

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

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

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

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



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

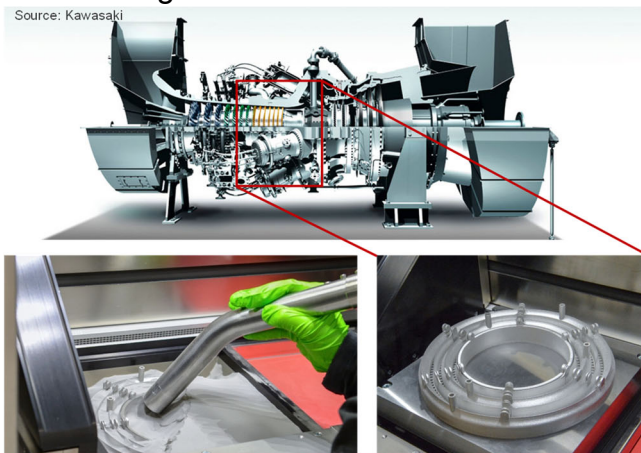
Der Anlaufprozess für eine Serienfertigung stellt in der Regel einen personellen und zeitlich aufwendigen Prozess für produzierende Unternehmen dar. Hierzu sind umfangreiche experimentelle Untersuchungen an klein- mittleren Losgrößen notwendig, um die Fertigungsprozesse und die Fertigungsabläufe innerhalb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

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

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

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

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



- Funktionsintegration bei der Bauteilauslegung
 - Komplexe Innenstruktur mit Überstromöffnungen
 - Aerodynamisch günstigere Außenkontur
 - Design for Additive Manufacturing
- Fertigung mittels Laser Power Bed Fusion (LPBF) als wasserstoffdichtes Bauteil aus nichtrostendem, hochwarmfestem Stahl 1.4404
- 100 % Materialnutzung
- Energiegewinnung durch Verbrennung von grünem Wasserstoff

Bedarf: Entwicklung und Produktion von nachhaltigen Produkten muss Hand-in-Hand erfolgen

Abbildung 14: Funktionsintegrierte Entwicklung und Produktion von nachhaltigen Produkten

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

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

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

3.3 Vision

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



Abbildung 15: Halbzeuge als Ausgangsmaterial für nachhaltige neue Produkte

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

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

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

4 Zusammenfassung

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

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

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

5 Literatur

- [1] United Nations. „UN Sustainable Development Goals.” un.org. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (Zugriff am: 21. Feb. 2023).
- [2] Europäischer Rat und Rat der Europäischen Union. „Ein europäischer Grüner Deal.” consilium.europa.eu. <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/> (Zugriff am: 21. Feb. 2023).
- [3] M. M. Bjørnbet, C. Skaar, A. M. Fet und K. Ø. Schulte, „Circular economy in manufacturing companies: A review of case study literature,” *Journal of Cleaner Production*, Jg. 294, Art.-Nr. 126268, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126268.
- [4] J. Kirchherr, D. Reike und M. Hekkert, „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions,” *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 127, S. 221–232, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- [5] P. Schroeder, K. Anggraeni und U. Weber, „The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals,” *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 23, Nr. 1, S. 77–95, 2019, doi: 10.1111/jiec.12732.
- [6] M. Eigner und R. Stelzer, *Product Lifecycle Management* (VDI-Buch). 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [7] J. Stark, *Product Lifecycle Management (Volume 1): 21st Century Paradigm for Product Realisation* (Decision Engineering). 4. Aufl. Cham: Springer, 2020.
- [8] P. Wang, S. Kara und M. Z. Hauschild, „Role of manufacturing towards achieving circular economy: The steel case,” *CIRP Annals*, Jg. 67, Nr. 1, S. 21–24, 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.049.
- [9] N. Z. Nasr *et al.* „Re-defining Value: The Manufacturing Revolution: Remanufacturing, Refurbishment, Repair and Direct Reuse in the Circular Economy.” resourcepanel.org. <https://www.resourcepanel.org/file/1105/download?token=LPqPM9Bo> (Zugriff am: 21. Feb. 2023).
- [10] F. Blomsma *et al.*, „Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation,” *Journal of Cleaner Production*, Jg. 241, Art.-Nr. 118271, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118271.
- [11] A. M. King, S. C. Burgess, W. Ijomah und C. A. McMahon, „Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle?,” *Sustainable Development*, Jg. 14, Nr. 4, S. 257–267, 2006, doi: 10.1002/sd.271.
- [12] „Richtlinie 2008/98/DE des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien,” Europäische Union, Straßburg, 2008. Zugriff am: 22. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>
- [13] S. Sihvonen und T. Ritola, „Conceptualizing ReX for Aggregating End-of-life Strategies in Product Development,” *Procedia CIRP*, Jg. 29, S. 639–644, 2015. doi: 10.1016/j.procir.2015.01.026.
- [14] J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell und A. Hanemaaijer. „Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain: Policy Report.” pbl.nl. <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf> (Zugriff am: 23. Feb. 2023).

- [15] World Resource Institute. „Greenhouse Gas Protocol (GHG).“ ghgprotocol.org. <https://ghgprotocol.org/> (Zugriff am: 23. Feb. 2023).
- [16] D. Brissaud und P. Zwolinski, „The Scientific Challenges for a Sustainable Consumption and Production Scenario: The Circular Reuse of Materials for the Upgrading and Repurposing of Components,“ *Procedia CIRP*, Jg. 61, S. 663–666, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.148.
- [17] T. Bergs *et al.*, „Nachhaltige Produktion mit dem Digitalen Zwilling,“ in *Internet of Production – Turning Data into Sustainability: AWK'21*, 2021, S. 119–150.
- [18] *ISO 23247-1:2021, Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles*, 23247-1:2021, International Organisation for Standardization, 2021.
- [19] *VDI/VDE 2610, Exchange format for gear data - Gear Data Exchange Format (GDE Format) - Definition*, 2610, Verein deutscher Ingenieure, 2021.
- [20] Catena-X Automotive Network. „Die Vision von Catena-X.“ [catena-x.net](https://catena-x.net/de/vision-ziele). <https://catena-x.net/de/vision-ziele> (Zugriff am: 23. Feb. 2023).
- [21] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). „Manufacturing-X: Initiative zur Digitalisierung der Lieferketten in der Industrie.“ [plattform-i40.de](https://www.plattform-i40.de). https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Manufacturing-X.pdf?__blob=publicationFile&v=14 (Zugriff am: 28. Feb. 2023).
- [22] Mercedes-Benz. „Mercedes-Benz B2B Connect.“ b2bconnect.mercedes-benz.com. <https://b2bconnect.mercedes-benz.com/de#home> (Zugriff am: 28. Feb. 2023).

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 2.1:

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

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