

4.1 Ordnungsrahmen für eine zirkuläre Produktionswirtschaft

G. Schuh, S. Schmitz, G. Lukas, L. Niwar, M. Welsing, R. Calchera

Gliederung

1	Einleitung	306
2	Wertsteigernde Kreislaufwirtschaft	309
3	Framework for Circular Production Economy	312
4	Handlungsfeld: Produktarchitektur	316
5	Handlungsfeld: Innovationsstrategie	319
6	Handlungsfeld: Geschäftsmodell	321
7	Handlungsfeld: Wertschöpfungsstrategie	323
8	Befähiger: KI-basiertes Lifecycle Management	325
9	Zusammenfassung	329
10	Literatur	330

Kurzfassung

Ordnungsrahmen für eine zirkuläre Produktionswirtschaft

Die wertsteigernde Kreislaufwirtschaft ist ein nachhaltiges Konzept für die Produktion von Produkten. Ein zentraler Aspekt der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft ist die Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks. Gleichzeitig ermöglicht die erfolgreiche Umsetzung des Konzepts auch eine Zielerfüllung in den Dimensionen der Wirtschaftlichkeit und Innovation. Eine konsequent ausgerichtete wertsteigernde Kreislaufwirtschaft eliminiert die ökologisch negativen Konsequenzen der Produktion und erhöht die Wertschöpfung und Profitabilität der beteiligten Unternehmen langfristig. Der vorliegende Beitrag motiviert und erklärt das Konzept der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft. Zudem wird ein Framework präsentiert, welches Unternehmen bei der Transformation unterstützt. Dafür werden sowohl die Produktarchitektur, das Geschäftsmodell sowie die Innovations- und Wertschöpfungsstrategie von den Paradigmen der etablierten, linearen Wirtschaft gelöst und auf eine Wertsteigerung und Langlebigkeit ausgerichtet. Damit alle Stakeholder die zur Partizipation notwendigen Informationen abrufen können, wird der digitale Schatten im Internet of Sustainable Production als Basis für die Realisierung mit eingebunden. Für den verlängerten Produktlebenszyklus fungiert zudem eine digitale Produktakte als digitaler Schatten, in dem alle relevanten Informationen gebündelt und aggregiert werden.

Schlagwörter: Wertsteigernde Kreislaufwirtschaft, Produktion, Upgrade, Framework

Abstract

Framework for Circular Production Economy

The value-enhancing circular economy is a concept for the sustainable production of Goods. A central aspect of the value-enhancing circular economy is the reduction of the ecological footprint. At the same time, successful implementation of the concept supports accomplishing of targets in the dimensions of economic efficiency and innovation. A consistently aligned upgrade circular economy eliminates the ecologically negative consequences of production and increases the long-term value creation and profitability of the companies involved. This paper motivates and explains the concept of the upgrade circular economy. In addition, a framework is presented that supports companies in the transformation process towards it. For this purpose, the product architecture, the business model as well as the innovation and value creation strategy are detached from the paradigms of the established linear economy and oriented towards value enhancement and longevity. In order to ensure that all stakeholders have access to the information required for their participation, the digital shadow in the Internet of Sustainable Production is necessary. For the extended product life cycle, a digital product file acts as a digital shadow, bundling and aggregating all relevant information.

Keywords: Value-enhancing Circular Economy, Production, Upgrade, Framework

1 Einleitung

Klimawandel, Biodiversitätsverlust und vermehrte globale Verschmutzung stellen wesentliche Herausforderungen für die Gesellschaft dar. Sie beeinflussen das ökologische Gleichgewicht der Erde und riskieren damit die Lebensgrundlage der aktuellen und zukünftigen Bewohner [1]. Um die Chancen der kommenden Generationen nicht zu gefährden, ist es unumgänglich, dass schnell beständige Lösungen für diese Bedrohungen gefunden werden.

In der Auseinandersetzung mit dem Klimawandel spielt die Produktion eine zentrale Rolle. Gründe dafür sind mit der Produktion verbundene Effekte wie Ressourcenverbrauch, Abfallmengen, Umweltverschmutzung und Treibhausgasemissionen. Gase wie Kohlenstoffdioxid, Methan und Fluorchlorkohlenwasserstoffe haben eine direkte Auswirkung auf den globalen Treibhauseffekt. Als direkter Treiber des Temperaturanstiegs der Erde stehen Treibhausgasemissionen daher im politischen Fokus. Um dem angestrebten 1.5°C Ziel des Pariser Klimaabkommens gerecht zu werden, müssen die globalen CO₂ Emissionen als Versucher des Klimawandels gesenkt werden [2]. Allein durch den Energiebedarf von Produktion und Logistik entstehen weltweit über 40% der CO₂ Emissionen [3]. Eine Reduktion von Treibhausgasen in Produktionsprozessen und Transport ist somit nicht nur wünschenswert, sondern unabdingbar. Treibhausgasemissionen sind nicht die einzigen negativen Auswirkungen, die im Produktionssektor entstehen. Der steigende Konsum von limitierten Ressourcen führt zwangsläufig in eine Knappheit. Produzierende Unternehmen müssen folglich Lösungen bieten, um mit der steigenden Ressourcenknappheit umzugehen.

Eine der Herausforderungen für Unternehmen bei der Herstellung und Vermarktung von ganzheitlich nachhaltigen (ökologisch, ökonomisch und sozial) Produkten besteht darin, dass viele Kunden zwar Interesse an umweltfreundlichen oder ethisch produzierten Produkten haben, jedoch nicht bereit sind, einen höheren Preis dafür zu zahlen. Obwohl viele Verbraucher das Bewusstsein für Umweltfragen erhöht haben und ein Interesse an nachhaltigen Produkten haben, ist für viele der Preis ein ausschlaggebendes Kriterium bei der Kaufentscheidung [4]. Um diese Herausforderung zu bewältigen, müssen Unternehmen Wege finden, um die Produktionskosten für nachhaltige Produkte zu senken und die Wahrnehmung der Kunden über die Bedeutung von Nachhaltigkeit zu verändern. Deshalb sind oft Kosteneinsparungen ein Hauptmotivation für Maßnahmen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit und weniger der tatsächliche Willen für mehr Umweltschutz [5]. Mittlerweile stellt sich jedoch die Frage, inwiefern ein klassisches Produktionsmodell langfristig noch profitabel ist. Energie-, Rohstoff- und Vormaterialpreise sind aufgrund globalpolitischer und sicherheitskritischer Ereignisse gestiegen, werden aber aufgrund von Vertragsbindungen, Wettbewerbsdruck oder geringer Zahlungsbereitschaft der Kunden nicht direkt an diese weitergegeben. Im Jahr 2022 haben verarbeitende Gewerbe nur 50% ihrer gestiegenen Kosten weiter gegeben [6]. Mangelt es Unternehmen an Möglichkeiten ihre entstandenen Kosten zu decken, gefährdet dies essenziell ihre Geschäftsgrundlage. Preissteigerungen aufgrund kurzfristiger Turbulenzen stellen dabei einen Ausblick auf die langfristige Situation für Unternehmen dar. Die Preise werden aufgrund von begrenzten Rohstoffverfügbarkeiten weiter steigen [7]. Deshalb benötigt die produzierende Industrie neue Lösungen, um existierende Ressourcen in Kreisläufen zu erhalten und somit auch die durch Abfallaufkommen erzeugten Gefahren für Umwelt und Gesellschaft zu reduzieren.

Bisherige Maßnahmen zur Erreichung einer nachhaltigen Produktion haben zwar dazu beigetragen, den ökologischen Fußabdruck der Produktion zu verringern. Jedoch reichen

Maßnahmen mit einer Einsparung im einstelligen Prozentbereich nicht aus, um eine wirklich nachhaltige Produktion ohne schädlichen Einfluss auf die Umwelt zu erreichen. Dafür bedarf es deutlich signifikantere Einsparungen oder sogar vollständig neue Ansätze. Die meisten Unternehmen betrachten Produktionsprozesse unabhängig voneinander, statt den gesamten Lebenszyklus eines Produktes zu berücksichtigen. Dies führt dazu, dass die Umweltauswirkungen eines Produkts in einzelnen Phasen nicht vollständig erfasst werden und die tatsächlichen Auswirkungen unterschätzt werden.

Ein umfassend nachhaltiger Ansatz erfordert eine gesamtheitliche Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts, von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Transport, Nutzung und Wiederverwendung. Unternehmen müssen sich darauf konzentrieren, ihre Umweltauswirkungen in allen Phasen des Lebenszyklus zu minimieren und gleichzeitig die sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen ihrer Produktion zu berücksichtigen [8]. Wenn ein Unternehmen versucht, zu hohe Skaleneffekte zu erzielen und infolgedessen zu viel produziert, kann dies erhebliche Umweltauswirkungen haben. Die Auswirkungen beeinträchtigen das Klima, die Luft- und Wasserqualität sowie die Biodiversität. Es ist wichtig, dass Unternehmen ihre Produktionsprozesse nachhaltig gestalten und sicherstellen, dass sie nur so viel produzieren, wie tatsächlich benötigt wird, um die Umweltbelastung zu minimieren. Ein Ansatz, um weniger Neuprodukte zu produzieren, ist die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten. Damit die Konsumenten dabei nicht auf technische Innovationen verzichten müssen, bedarf es bei diesem Vorgehen einer Möglichkeit für Upgrades. So werden mittels Upgrades neue Funktionen in ein Produkt eingebracht. Diese neuen Funktionen führen zudem zu einer Wertsteigerung des aktualisierten Produktes und bieten Unternehmen die Möglichkeit für Umsatzgenerierungen unabhängig von einer Neuproduktion. Eines solches Vorgehen wird auch als wertsteigernde Kreislaufwirtschaft bezeichnet und im nachfolgenden Beitrag genauer erläutert und motiviert.

Aktuell eingesetzte Ansätze versprechen die Reduktion von Treibhausgasen, einen geringeren Energieverbrauch, verbesserte Recyclinganlagen und ressourcensparende Produkte. Diese Ansätze adressieren einzelne Probleme, umfassen jedoch kein ganzheitliches Konzept. Es fehlt ein Konzept, das die Produktionswirtschaft auf eine Art ausrichtet, die das Aufhalten des Klimawandels fördert, die Ökosysteme erhält oder wiederherstellt und die Gesundheit aller Lebewesen auf unserer Erde unterstützt. Eine wertsteigernde Kreislaufwirtschaft verspricht aktuelle Probleme im Produktionskontext zu lösen, und Wirtschaftswachstum mit Ressourcenknappheit in Einklang zu bringen. Als ganzheitliches System betrachtet die wertsteigernde Kreislaufwirtschaft den gesamten Lebenszyklus der Ressourcen und erhält diese im System. Auch politisch manifestiert sich die Idee einer wirtschaftlichen Entwicklung zu einer ganzheitlichen Kreislaufwirtschaft. Im europäischen Green Deal von 2020 ist ein Aktionsplan inklusive konkreter Maßnahmen zur Entwicklung der Wirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft fest verankert [9]. Der politische Druck auf Unternehmen, ihre Produktionsprozesse umzustellen, nimmt ebenso wie das gesellschaftliche Bewusstsein für nachhaltige Produkte zu [10]. Dies bietet eine bedeutende Chance für die Entwicklung neuer Technologien und das aktive Vorantreiben neuer Geschäftsmodelle.

Begutachtet man das Konzept einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft, existieren intuitiv überwiegend positive Aspekte. Daher entsteht die Frage, warum viele produzierende Unternehmen noch weit weg von einer Umgestaltung sind und an bestehenden linearen Wirtschaftssystemen festhalten. Eine genauere Betrachtung der Bestandteile einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft ermöglicht Einblicke in die aktuellen Hindernisse für Unternehmen. Zum Etablieren einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft ist die Entwicklung

von neuen Produkten, die Produktion dieser Produkte und eine Akzeptanz für diese notwendig. Etablierte Produktentwicklungen führen zu Komplettlösungen mit neuen Funktionen, die das Entsorgen veralteter Produkte fördern und womit diese aus dem Umlauf genommen werden. Statt die Entwicklung hin zu einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft zu fördern, führt dies nur zu noch höheren Abfallmengen und zu weiteren Abhängigkeiten von begrenzten Ressourcen. Bestehende technische Konsumgüter sind hochintegrierte Produkte, die aufgrund der steigenden Komplexität schwer zu reparieren sind und einen hohen Recyclingaufwand verlangen. Eine Veränderung hin zu modularen Produkten, die sich durch ein einfaches Austauschen der Komponenten auszeichnen, bieten eine gute Reparierbarkeit und Ausbaufähigkeit. Diese komplette Neuausrichtung der Produkte erfordert jedoch ein Umstrukturieren der Produktionsprozesse. Derzeit hindern Übergangskosten, wie Investitionen in technologische Vorhaben, die Ausbildung von Mitarbeitern für neue Tätigkeiten, sowie die Umstellen der Produktion, Unternehmen daran ihre Produktion auf nachhaltige Produktmöglichkeiten umzustrukturieren [11]–[13]. Selbst wenn potenziell die finanziellen Mittel zur Verfügung ständen, eine neue Produktion zu etablieren, mangelt es Unternehmen häufig an fundiertem Fachwissen und technologischem Know-how zur Umsetzung [14], [15].

Produktionsabläufe wurden in vielen Unternehmen lange optimiert. Die Industrialisierung von Wiederaufbereitungs- und Upgrade-Prozessen erfordert eine umfassende Überarbeitung der Produktionsplanung, Prozessoptimierung, Organisation und IT-Systeme, um eine effiziente und skalierbare Produktion von wiederaufgearbeiteten Produkten zu ermöglichen. Um dies zu erreichen, ist es notwendig, Funktionserweiterungen, also Upgrades, im Re-Produktionsprozess zu berücksichtigen. Re-Assembly-Upgrade-Prozesse sparen bis zu 90 % der Material- und Umweltbelastung von Neuprodukten ein und erhöhen die Wertschöpfung pro Mitarbeiter, z. B. in der Fahrzeugproduktion, um etwa 30–60 %. Es ist wichtig, eine genaue Vorhersage der Nachfrage nach wiederaufgearbeiteten Produkten zu erstellen und sicherzustellen, dass genügend gebrauchte Produkte zur Verfügung stehen, um den Produktionsbedarf zu decken. Die Organisation muss angepasst werden, um eine reibungslose und effiziente Produktion von wiederaufgearbeiteten Produkten zu ermöglichen. Dies umfasst die Schulung von Mitarbeitern auf die spezifischen Anforderungen des Upgrade-Prozesses. Auch die Qualitätssicherung ist von entscheidender Bedeutung für die industrialisierte Wiederaufbereitung. Es ist wichtig, sicherzustellen, dass die wiederaufgearbeiteten Produkte den gleichen Standards entsprechen wie neu produzierte Produkte. Ist sowohl die Entwicklung neuer Produkte und ein Umstrukturieren der Produktionsprozesse möglich, stellen die Anforderungen von Kunden ein weiteres Hindernis zum Etablieren einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft dar. Die Kundenanforderungen an Produkte, möglichst günstig zu sein, neue Designanforderungen zu erfüllen und aktuelle Trends widerzuspiegeln stimmen nicht immer mit dem Gebrauch von wiederaufbereiteten Produkten, Recyclingmaterialien und langlebigen Produkten überein.

Werden die genannten Herausforderungen einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft gemeistert, bietet das System vielfältige Potentiale für die partizipierenden Unternehmen. So werden mit weniger Fabriken eine Umsatzsteigerung im zweistelligen Prozentbereich erzielt, bei einer gleichzeitigen Reduktion der Treibhausgasemissionen. Darüber hinaus werden insbesondere die Marge von produzierenden Unternehmen verdoppelt. Ursächlich dafür ist die bereits erwähnte Funktionserweiterung und Wertsteigerung, die bei geringeren Produktions- und Ressourcenaufwänden eine konstante Zahlungsbereitschaft der Kunden ermöglicht.

2 Wertsteigernde Kreislaufwirtschaft

Die Bemühungen für eine nachhaltige Produktion und umweltfreundliche Prozesse existieren genauso lange wie das damit verbundene Problemverständnis. Deshalb sind bereits diverse Ansätze mit den Begriffen der nachhaltigen Produktion assoziiert. Da diese Ansätze jedoch nicht die gewünschten Effekte einer umweltneutralen oder sogar positiven Bilanz erreicht haben, muss das Verständnis einer nachhaltigen Produktion erweitert werden. Nachhaltige Produktion kann durch neue Ansätze, wie die wertsteigernde Kreislaufwirtschaft, erreicht werden, welche bestehende Maßnahmen nicht ausschließen, sondern ergänzen (siehe Abbildung 1). Durch das Umdenken und Einführen einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft entsteht die Möglichkeit, eine nachhaltige Produktion nicht nur aus Gründen der bisher mangelnden Nachhaltigkeit zu etablieren, sondern auch aufgrund von ihrer Profitabilität. Denn langfristig betrachtet bietet eine konsequent umgesetzte nachhaltige Produktion nicht nur das größte Potential für die Umwelt, sondern auch für die Wirtschaftlichkeit und Innovation, insbesondere wenn die Prinzipien der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft berücksichtigt werden.



Abbildung 1: Beitrag der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft zur nachhaltigen Produktion

Die bestehenden Ansätze innerhalb des linearen Produktionsverständnisses hinsichtlich nachhaltiger Produktion sind geprägt von Energiesparmaßnahmen, Ausschussreduktion und Effizienzsteigerung. Diese Ansätze wirken zunächst ökologisch motiviert, haben jedoch ebenfalls einen finanziellen Antrieb. Insbesondere steigende Kosten für Energie stellen eine Motivation für Sparmaßnahmen dar. Eine Steigerung der Effizienz und eine Reduktion von Ausschuss innerhalb der Produktion sorgen sowohl für weniger Auswirkungen auf die Umwelt als auch für Kostenersparnisse des Unternehmens [16]. Eine bloße Effizienzsteigerung und Energieverbrauchsoptimierung reichen jedoch nicht aus, um eine Produktion in neutrale oder umweltpositive Prozesse zu transformieren. Eine in ihrer Effizienz optimierte Produktion benötigt weiterhin neue Ressourcen, um Produkte herzustellen. Um den Ressourcenverbrauch zu eliminieren wird ein System benötigt, dass nicht nur die Effizienz steigert, sondern durch die Wiederaufnahme bereits existie-

render Produkte eine Circular Economy aufbaut. Dies erfordert ein Umdenken von Unternehmen und unterscheidet sich vom herkömmlichen Produktionsverständnis, bei dem neue Ressourcen verwendet werden, um Produkte herzustellen und Produkte nach der Nutzungsdauer entsorgt werden. Mit konsequenten Kreisläufen wird es möglich sein, umweltneutrale Prozesse umzusetzen und langfristig umweltpositive Auswirkungen zu erzielen.

Langfristig nachhaltig ist die komplette Produktionswirtschaft zu überdenken und ein zirkuläres Produktionssystem zu etablieren. Das aktuelle Verständnis einer Kreislaufwirtschaft besteht vorwiegend aus Konzepten wie Recycling, Abfalltrennung, und Rohstoffsicherung. Produkte werden nicht ordnungsgemäß entsorgt oder bleiben, im Hinblick auf ungenutzte Handys, in Schubladen liegen. Endkunden stellen somit eine erhebliche Hürde in der Umsetzung von Recyclingvorgängen dar. Um die einzelnen Bestandteile eines Produkts zu recyceln, wird außerdem ein deutlich höherer Energieaufwand benötigt, als um ein Produkt weiter zu nutzen. Während Unternehmen intuitiv Produkte entwickeln, die in absehbarer Zeit ersetzt werden müssen, ist es langfristig sowohl für das Unternehmen als auch die Umwelt nachhaltiger Produkte mit einer längeren Lebensdauer zu produzieren. Durch die Verlängerung der Lebensdauer eines Produkts wird weniger Ressourcenverbrauch und Abfall generiert, was zu einer Verringerung der Umweltauswirkungen beiträgt. Gleichzeitig erzielen Unternehmen durch die Umsetzung von Lebensverlängerungsmaßnahmen auch wirtschaftliche Vorteile. Die Entwicklung von Produkten mit einer langen Lebensdauer senkt nicht nur den Recyclingbedarf, sondern auch den Bedarf an neuen Produkten. Durch die mögliche Reduktion der Produktion neuer Produkte werden Energieverbrauch und Konsum von begrenzten Rohstoffen minimiert. Kunden schätzen es, wenn ein Unternehmen lebensverlängernde Maßnahmen anbietet. Eine längere Lebensdauer des Produkts führt zu einer höheren Kundenzufriedenheit und Kundenbindung. Außerdem stärken Unternehmen, die sich für lebensverlängernde Maßnahmen einsetzen, ihr Image als nachhaltiges Unternehmen. Dies trägt langfristig dazu bei das Vertrauen der Kunden zu gewinnen und eine positive Wahrnehmung bei anderen Stakeholdern zu schaffen [17].

Ein langlebiges Produkt, das nach seiner Nutzung weiterverkauft wird und nicht entsorgt werden muss, reduziert den Konsum von begrenzten und umweltschädlichen Rohstoffen. Die Anzahl der Anbieter, die Altgeräte wieder aufkaufen, aufbereiten und für ein günstigeren Preis verkaufen, ist, aufgrund der veränderten Nachfrage, gestiegen [18]. Andere Unternehmen spezialisieren sich auf die Wiederaufbereitung von Altgeräten. Dafür werden verschiedene Altgeräte von Endnutzern eingekauft, aufgearbeitet und weiterverkauft. Ein Beispiel ist der Markt für Mobilgeräte. Der Wechsel eines Smartphone-Akkus genügt häufig bereits, um die ursprüngliche Funktion zu erhalten oder sogar die Akkulaufzeit zu verlängern, dadurch ist es möglich, dass das Gerät weiterverkauft und wieder genutzt wird. Eine Herausforderung für Unternehmen ist, dass die Rückgabe von Produkten nicht präzise prognostizierbar ist. Außerdem ist die Entwicklungsrate neuer Geräte so hoch, dass die Wiederaufbereitung der Geräte zügiger erfolgen muss um wiederaufbereitete Geräte schnell an den Markt zu bringen und attraktive Angebote anzubieten [19]. Zudem ist diese Art der Wiederaufbereitung nicht vollständig wettbewerbsfähig, da eine Funktionserweiterung fehlt und manche Kundengruppen deshalb Neuprodukte bevorzugen. Auch in der Fertigung werden lebensverlängernde Maßnahmen genutzt, um Maschinen und Anlagen mit möglichst wenig Ausfällen zu betreiben. Dafür werden Nutzungsdaten analysiert, sodass das Verhalten der Maschinen vorausgesagt wird [20]. Zwar werden so Ausfälle in der Produktion besser prognostiziert und die Lebensdauer der Maschinen verlängert, aber eine komplett nachhaltige Produktion wird dadurch nicht erreicht, da sich

diese Maßnahme nur auf die Lebensdauer der Maschinen konzentriert. Durch die Verlängerung der Lebensdauer der Maschinen wird der Ressourcenverbrauch reduziert und weniger Abfall produziert. Somit sind dies essenzielle Maßnahmen für die nachhaltige Entwicklung der Industrie. Werden die Produkte langlebiger fehlt jedoch der Marktbedarf und damit auch die Anforderung an neue Technologien. Die kontinuierlich steigende, wissenschaftlich und technische Entwicklung könnte so sich verlangsamen oder stagnieren. Dies ist eine Herausforderung für die Gesellschaft, denn neue Technologien bieten vielfältige Mehrwerte. Die technische Entwicklung trägt dazu bei, Abläufe effizienter zu gestalten und Lösungen für unsere aktuellen Klimaauswirkungen zu schaffen. Eine Gesellschaft verändert sich im Laufe der Zeit, jedoch bietet eine stagnierende wirtschaftliche Entwicklung Unternehmen keine Chance auf die neuen Bedürfnisse mit passenden Lösungen zu reagieren. Daher brauchen Unternehmen Möglichkeiten um die Lebensdauer von Produkten zu erhöhen, ohne dabei die technische Entwicklung zu behindern. Eine Möglichkeit und ein Erfordernis um alte Produkte weiter zu nutzen ist die Produktaufwertung durch eine Funktionserweiterung durch Updates und Upgrades, anstelle einer reinen Funktionserhaltung [21]. Obwohl intuitiv lebensverlängernde Maßnahmen weder mit technologischem Fortschritt noch mit der Aufwertung von Produkten verbunden werden, schafft die Funktionserweiterung eine Wettbewerbsfähigkeit von wiederaufbereiteten Produkten im Verhältnis zu Neuprodukten. Die Aufwertung von Produkten im Rahmen der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft wird deshalb als Upgrade Circular Economy bezeichnet. Möglich werden solche Aufwertungen durch eine neue Produktmodularität. Diese befähigt Unternehmen dazu die Leistungsfähigkeit ihrer Produkte zu verbessern und somit den Wert zu steigern [22]. Die Aktualisierbarkeit eines Produktes wirkt sich langfristig positiv auf die Umwelt aus, ohne dabei die Innovationskraft der Unternehmen zu hemmen [23]. Die neue Produktmodularität und somit die Möglichkeit den technologischen Wert kontinuierlich zu verbessern fördert die gesellschaftliche Entwicklung und die langfristige Aufrechterhaltung einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft [24]. Von den bereits etablierten Konzepten der Modularität unterscheidet sich die neue Produktmodularität in ihrer Ausrichtung. Im Gegensatz zur traditionellen Produktmodularität, bei der jedes Modul in der Regel für eine bestimmte Funktion oder Eigenschaft des Produkts verantwortlich ist, bezieht sich die neue Produktmodularität auf eine modulare Struktur, die eine höhere Flexibilität und Anpassungsfähigkeit ermöglicht. So können Verschleißteile leichter ausgetauscht, neue Funktionalitäten schneller integriert und Standardfunktionen erhalten werden. Die neue Produktmodularität ermöglicht Unternehmen, schnell auf sich ändernde Marktbedingungen oder Kundenbedürfnisse zu reagieren, indem sie modulare Designs verwenden um das Produkt leicht zu ändern. Dadurch sind Unternehmen in der Lage ihre Produkte schneller und kosteneffizienter auf den Markt bringen und gleichzeitig eine größere Anzahl von Kundenbedürfnissen erfüllen.

Die Möglichkeit Produkte anhand von Funktionserweiterungen und Wertsteigerungen lange im Markt zu halten, ist aufgrund der ressourcenschonenden Art ökologisch sinnvoll [25]. Lebensverlängernde Maßnahmen werden deshalb auch auf politischer Ebene gefordert. Anfang des Jahres 2022 wurde von der europäischen Kommission, als Teil des Ziels Europa bis 2050 zu dem ersten klimaneutralen Kontinent zu machen, ein Vorschlag vorgestellt, der die Vorschriften für den Verbraucherschutz überarbeitet. Dieser sieht vor, dass Unternehmen über die Lebensdauer ihrer Produkte informieren müssen und Angaben zu der Reparierbarkeit ihrer Produkte zur Verfügung stellen. Ferner sollen fehlende Angaben über Eigenschaften, welche die Lebensdauer gezielt beschränken, als unlautere Geschäftspraktik gelten [26]. Die Verbraucher profitieren von den resultierenden kos-

tengünstigen Möglichkeiten neue Technologien in ihre bestehenden Geräte zu integrieren. Aufgrund des Prinzips der neuen Produktmodularität, der Fokussierung auf technische Kernfunktionen des Produkts und der austauschbaren Funktionserweiterung entsteht ein geringerer Produktionsaufwand. Dadurch werden weniger Rohmaterialien verbraucht, Ressourcen gespart und die Produktionskosten gesenkt. Dies ermöglicht Unternehmen das verbesserte Produkt für Konsumenten, im Vergleich zu einem komplett neu produzierten Produkt, kostengünstiger zur Verfügung zu stellen. Ein breiteres Abdecken verschiedener Marktsegmente durch eine günstige Basisvariation oder Variationen mit neuester Technik und vollem Funktionsumfang erfüllt mehr Kundenanforderungen. Eine modulare Produktpolitik ist sowohl für Umwelt als auch Gesellschaft in Form von politischen Anforderungen und der Kundenzufriedenheit sinnvoll, wird jedoch mit einer reduzierten Wettbewerbsfähigkeit in Verbindung gebracht. Dabei ist die neue Produktmodularität für Unternehmen finanziell sinnvoll. Durch ein breiteres Abdecken verschiedener Marktsegmente wird eine größere Marktabdeckung erreicht und mehr Umsatz für das Unternehmen erzielt. Dem Unternehmen bietet die neue Produktmodularität zusätzlich eine hohe Kundebindung, da Kunden ihre Produkte langfristig upgraden wollen. Der Wechsel zu einem anderen Hersteller ist mit einer höheren finanziellen Hürde versehen, da das Grundgerüst des Produkts neu erworben werden müsste, anstatt lediglich die Funktionserweiterung zu erwerben. Die langfristige Kundenbindung bietet somit die Chance für planbare und konstante Einnahmen sowie höhere Gewinnmargen. Dies ist möglich, wenn der Neukauf von Kunden durch ein Upgrade substituiert wird. Ein Upgrade bietet dem Kunden einen ähnlichen Mehrwert wie ein Neuprodukt, weshalb eine ähnliche Zahlungsbereitschaft existiert. Gleichzeitig bedeutet ein Upgrade jedoch für ein Unternehmen deutlich geringere Aufwände und somit eine größere Differenz zwischen Kosten und Marktpreis. Diese Ersparnis führt somit zu einer gesteigerten Profitabilität bei einer simultanen Entlastung von Umwelt und Ressourcen.

Insgesamt ist es im Hinblick auf eine nachhaltige Produktion notwendig intuitive Gedanken zu hinterfragen und innovative Ansätze wie die wertsteigernde Kreislaufwirtschaft und neue Produktmodularität zu betrachten. Eine Produktion, die zirkulär ausgerichtet ist, lebensverlängernde Maßnahmen auf allen Ebenen umsetzt und den Werterhalt durch die Wiederaufnahme der Produkte zur Reparatur oder Funktionserweiterung ermöglicht, ist in allen Dimensionen der Nachhaltigkeit sinnvoll. Der Wandel von einer traditionellen linearen Produktion hin zu einer nachhaltigen, geschlossenen, zirkulären Produktion erfordert strukturelle Veränderungen in einem Unternehmen. Die Art und Weise, wie Produktionsprozesse ablaufen, Produkte entwickelt werden und wie mit Stakeholdern umgegangen wird, verändert sich. Ein Framework zum Umsetzen einer solchen Upgrade Circular Production Economy soll Unternehmen dazu befähigen, eine wertsteigernde Kreislaufwirtschaft umzusetzen.

3 Framework for Circular Production Economy

Zum Erreichen einer Circular Production Economy muss ein produzierendes Unternehmen Dichotomien auflösen, die alle Bereiche der Unternehmensstrategie betreffen. Das Diagramm in Abbildung 2 zeigt die daraus resultierenden Handlungsfelder im Framework für Circular Production Economy und bietet die Möglichkeit zur Positionierung eines Unternehmens. Dafür wird die Wettbewerbsstrategie des Unternehmens in den vier Quadranten auf den jeweiligen Achsen eingetragen. Für einen konsequenten Strategy-Fit der Wettbewerbsstrategie müssen produzierende Unternehmen ihre Strategiepositionen in allen vier Quadranten ähnlich ausprägen, also entweder alle Positionen im Zentrum oder

am Rand des Frameworks platzieren. Bei einer Abweichung entsteht ein Mis-Fit, der zwangsläufig Wettbewerbsnachteile erzeugt [27].

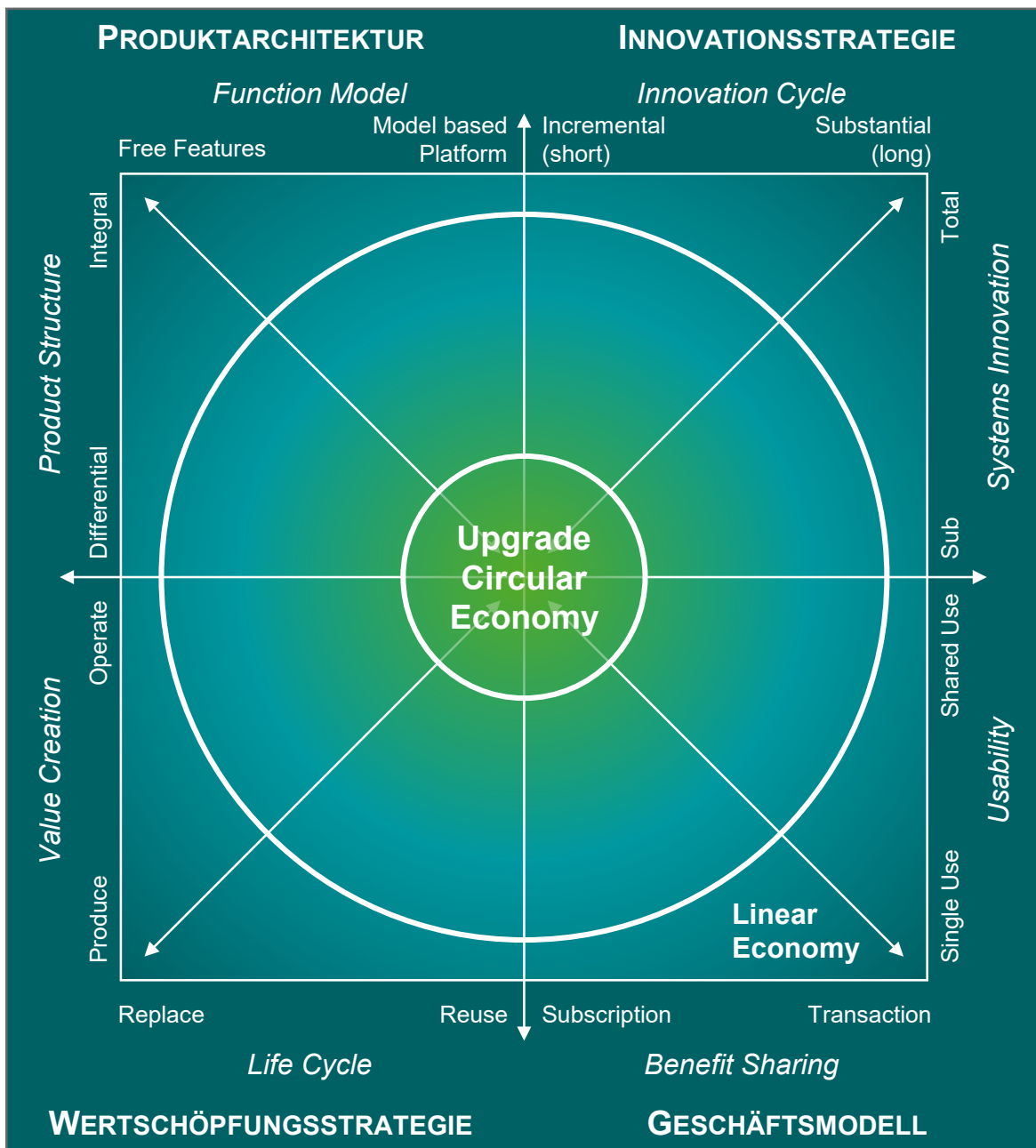


Abbildung 2: Framework for Circular Production Economy

Eine Positionierung in der Mitte des Diagramms zeigt, dass die Unternehmensstrategie mit den Prinzipien der Upgrade Circular Production im Einklang ist. Ein Unternehmen, welches so positioniert ist, ist in der Lage mit vergleichsweise geringen Aufwand eine wertsteigernde Kreislaufwirtschaft zu etablieren. Der äußere Ring des Frameworks repräsentiert die Charakteristiken der klassischen, linearen Wirtschaft. Unternehmen, die in allen Aspekten der Strategie den Rand besetzen, verfügen ebenfalls über eine konsistente und konsequente Strategie. Jedoch steht diese Strategie mit den in Kapitel 1 genannten Herausforderungen in Konflikt. Somit empfiehlt sich eine kritische Auseinandersetzung insbesondere mit Hinblick auf zukünftige Regularien und Kundenanforderungen. Für Unternehmen, die bei der Positionierung kein einheitliches Bild erzeugen, bietet das

Framework eine Hilfestellung. So wird erkannt, in welchen Bereichen das Unternehmen bereits gut aufgestellt ist und in welchen Handlungsbedarf besteht. Zudem verrät die exakte Positionierung auf den Achsen, wie dringlich der jeweilige Handlungsbedarf ist. Sobald sich ein Unternehmen entscheidet die eigene Aktivität stärker auf die Upgrade Circular Economy auszurichten, kann das Framework außerdem genutzt werden, um den aktuellen Status der Transformation zu überwachen.

Die *Produktarchitektur* ist der erste Quadrant des Frameworks für die Circular Production Economy. Eine Produktarchitektur beschreibt die Struktur eines Produkts, einschließlich der Anordnung und der Funktionen der Komponenten. Sie dient dazu, die Entwicklung, Fertigung und Wartung des Produkts zu erleichtern und sicherzustellen, dass es den Anforderungen der Kunden entspricht. Deshalb unterteilt sich die Produktarchitektur in die *Product Structure* und das *Function Model* des Produktes. Für die *Product Structure* wird zwischen einer *differential* und *integral* Bauweise unterschieden. Die *differential Structure* bezieht sich auf eine Konstruktion, bei der verschiedene Komponenten oder Systeme getrennt voneinander entwickelt und dann zusammengefügt werden. Die *integral Structure* hingegen bezieht sich auf eine Konstruktion, bei der verschiedene Komponenten so eng miteinander verbunden sind, dass sie eine Einheit bilden und gemeinsam entwickelt werden. Der Unterschied liegt darin, dass bei der *integral Structure* eine stärkere Integration und Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Komponenten oder Systemen angestrebt wird, während bei der *differential Structure* die Trennung und Spezialisierung von Komponenten im Vordergrund steht. Somit erleichtert eine differenzielle Bauweise die neue Modularisierung, also die Trennung von Funktionen in einzelnen Modulen [28]. Das *Function Model* betrachtet die einzelnen Funktionen, die ein Produkt mit Hinblick auf die Kundenanforderungen realisieren soll. Für das Framework wird zwischen *Free Features* und *Modelbased Platforms* unterschieden. *Free Features* werden unabhängig von Standards gezielt an den Kundenbedarf angepasst. *Modelbased Platforms* schaffen hingegen einen Rahmen inklusive Vorgaben für den Einsatz von Funktionen in einem Produkt. Im Zusammenspiel mit einer *differential Structure* werden so z.B. Funktionen über Module hinzugefügt, um eine Funktionserweiterung zu erreichen.

Die *Innovationsstrategie* wird über die Achsen *Innovation Cycle* und *Systems Innovation* abgebildet. Der *Innovation Cycle* beschreibt die Innovationsgeschwindigkeit, welche durch die Marktanforderungen und Technologiereife bestimmt wird. Produkte mit einer hohen Technologiereife und konstanten Marktanforderungen werden in der Regel *Incremental* verbessert. Also in kurzen Abständen werden schrittweise und aufeinander aufbauend neue Innovationen auf den Markt gebracht. Diese Innovationen entsprechen einer kontinuierlichen Verbesserung am Produkt. Gegenteilig dazu ist die *Substantial* Innovation zu betrachten. Diese Art des Innovationszyklus sieht die Veröffentlichung von vollständig neuen Funktionalitäten und Produkteigenschaften vor, die auf einen disruptiven Effekt am Markt abzielen. Aufgrund der damit verbundenen Grundlagenforschung und den Entwicklungsaufwänden, erfolgen solche Innovationen eher in längeren Innovationszyklen. Die Systeminnovationen beziehen sich sowohl auf das *Sub-System* als auch das *Total-System*. Hierbei wird darauf abgezielt, bestehende, komplexe Produkte auf systematische Weise zu verändern und zu verbessern. Dabei werden unterschiedliche Aspekte eines Systems wie z.B. Technologie, Prozesse, Regulierungen, Verhaltensweisen und Umweltfaktoren berücksichtigt und gezielt verändert oder integriert. *Systems Innovation* ist somit eine multidisziplinäre und ganzheitliche Herangehensweise an die Innovation, die darauf abzielt, langfristige und tiefgreifende Veränderungen zu bewirken [29]. Insbesondere wenn das gesamte System betrachtet wird, ist auch eine *Substantial* Innovation hinsichtlich des Innovationszyklus möglich.

Der Quadrant des *Geschäftsmodells* besteht aus den Achsen *Usability* und *Benefit Sharing*. Die *Usability* beschreibt in diesem Kontext wie oft und von wie vielen Personen ein Produkt genutzt wird. Ein *Single Use* steht für die einmalige Nutzung eines Produktes von nur einer Person. Konträr dazu ist die Charakterisierung des *Shared Use*. In diesem Fall wird ein Produkt nicht nur mehrfach, sondern auch von einer Vielzahl an Personen verwendet. Diese Produkte sind z.B. Verkehrsmittel wie Fahrräder, Autos oder öffentliche Verkehrsmittel, aber auch komplexe Produkte wie Fertigungsmaschinen oder Produktionsanlagen. Die Idee hinter *Shared Use* ist, die Nutzung von Produkten effizienter zu gestalten und gleichzeitig die Umweltbelastung und Kosten zu reduzieren. Durch die gemeinsame Nutzung werden Produkte und Anlagen besser ausgelastet, was wiederum zu einer Reduzierung des Bedarfs an neuen Ressourcen führt. *Shared Use* fördert auch den sozialen Austausch und die Zusammenarbeit, indem es Menschen die Möglichkeit gibt, sich zu treffen und zusammenzuarbeiten, die sonst möglicherweise keinen Zugang zu solchen Produkten hätten. Für Unternehmen ist *Shared Use* wirtschaftlich sinnvoll, da die Auslastung der Produkte erhöht wird und durch neue Geschäftsmodelle wiederkehrende Einnahmen generiert werden. Das *Benefit Sharing* beschreibt die Art der Zahlungskonditionen zwischen Anbieter und Nutzer. Auf dieser Achse wird zwischen *Transaction* und *Subscription* Beziehungen unterschieden. *Transaction* Beziehungen basieren auf einzelnen Transaktionen, also Verkäufen von Produkten oder Dienstleistungen, bei denen der Kunde für jede einzelne Transaktion bezahlt. *Subscription* Beziehungen hingegen basieren auf einem regelmäßigen Einkommen aus wiederkehrenden Zahlungen von Kunden, die für den Zugang zu einem bestimmten Produkt oder einer bestimmten Dienstleistung bezahlen [30]. Der Hauptunterschied zwischen diesen Geschäftsmodellen ist, dass das *Transaction* Modell auf einmaligen Verkäufen von Produkten oder Dienstleistungen basiert, während das *Subscription* Modell auf einem wiederkehrenden Einkommen aus Abonnements basiert.

Der vierte Quadrant des Frameworks ist die *Wertschöpfungsstrategie*, welche sowohl die *Value Creation* als auch den *Life Cycle* betrachtet. Die *Value Creation* ist unterteilt in *Produce* und *Operate*. Dies sind zwei unterschiedliche Phasen im Wertschöpfungsprozess eines Unternehmens. Bei *Produce* wird ein Produkt aus Rohstoffen, Komponenten oder geistigem Eigentum hergestellt. Der Wert wird durch die Umwandlung von Inputs in Outputs geschaffen, die für den Kunden einen höheren Wert haben. *Operate* hingegen umfasst die Lieferung des Produkts oder einer Dienstleistung an den Kunden und seine Betreuung während des gesamten Lebenszyklus. Der Wert wird geschaffen, indem die Bedürfnisse und Erwartungen des Kunden erfüllt werden, Upgrades und Updates installiert, ein positives Kundenerlebnis geschaffen wird und die Kundentreue gestärkt wird. Der *Life Cycle* unterscheidet zwischen den konträren Ansätzen *Replace* und *Reuse*. *Replace* bedeutet, dass ein Produkt ersetzt und entsorgt wird. Der Ersatz erfolgt entweder durch ein neues Produkt, das die ähnlichen Funktionen erfüllt, oder durch ein Produkt, das eine verbesserte Leistung oder Funktionalität bietet. *Reuse* hingegen bedeutet, dass das Produkt wiederverwendet wird, anstatt es zu ersetzen. Dafür wird das Produkt über Updates und Upgrades mit neuen Funktionen ausgestattet, so dass der Wert gesteigert wird und ein Weiterverkauf möglich ist. Dieses Vorgehen steht stellvertretend für die Upgrade Circular Production Economy. Das Ziel der Upgrade Circular Production Economy besteht darin, die Lebensdauer von Produkten zu verlängern und die Notwendigkeit zu reduzieren neue Produkte zu produzieren.

Nachfolgend werden die einzelnen Handlungsfelder der Quadranten des Frameworks sowie die notwendigen Befähiger zum Erreichen der Dimensionen detailliert vorgestellt.

4 Handlungsfeld: Produktarchitektur

Das Handlungsfeld der Produktarchitektur zielt auf eine neue Produktmodularität ab. Dabei handelt es sich um ein Konzept, in welchem Produkte aus standardisierten Bauteilen und Komponenten zusammengesetzt werden. Diese Bauteile und Komponenten charakterisieren sich dadurch, dass sie einfach auszutauschen und zu reparieren sind [31]. Dies befähigt Unternehmen dazu ein Produkt nicht mehr als eine integrale Produktstruktur zu sehen, sondern als eine differentiale Struktur, die eine Summe ihrer Bauteile und Komponenten ist. Mit dem Ende der Lebensdauer muss somit nicht mehr das gesamte Produkt ersetzt werden, stattdessen werden beschädigte Bauteile repariert oder ersetzt. Hiermit soll im Sinne der Kreislaufwirtschaft der Abfall reduziert, die Ressourceneffizienz gesteigert sowie ein höherer Grad an Wiederverwendbarkeit und Reparierbarkeit erreicht werden [32].

In der heutigen Zeit sind viele Unternehmen von der wirtschaftlichen Herausforderung der Kundennachfrage nach einer steigenden Produktvielfalt betroffen. Dies zwingt die Unternehmen dazu, ihre Produktpalette kontinuierlich um neue Produktvarianten zu erweitern. Dies hat einerseits zur Folge, dass die interne technologische Vielfalt erweitert werden muss, aber auch, dass die Komplexität solcher Produkte zunimmt. Um dieser Herausforderung erfolgreich entgegen zu treten, bietet sich das Konzept der neuen Produktmodularisierung an. Dies zeigt sich in der Produktstruktur, die sich von einer integralen zu einer differentiellen Produktstruktur zurückwandeln muss. So ermöglicht die Modularisierung von Produkten ein einfaches Upgrade. Wenn ein defektes Modul ersetzt werden muss, muss nur dieses Modul ausgetauscht werden. Anstatt die Lebensdauer des gesamten Produkts zu beenden, wird durch dieses Upgrade ein neuer Lebenszyklus des Produkts gestartet. Zudem ermöglicht die Modularisierung von Produkten auch ein einfaches Update. Wenn ein neues Modul entwickelt wird, wird es einfach in das bestehende Produkt integriert, ohne dass das gesamte Produkt ersetzt werden muss. Dieser Wandel zu zunehmend differential aufgebauten Produkten, bei denen jedes Bauteil lediglich eine Funktion abbildet, ist in Abbildung 3 dargestellt.

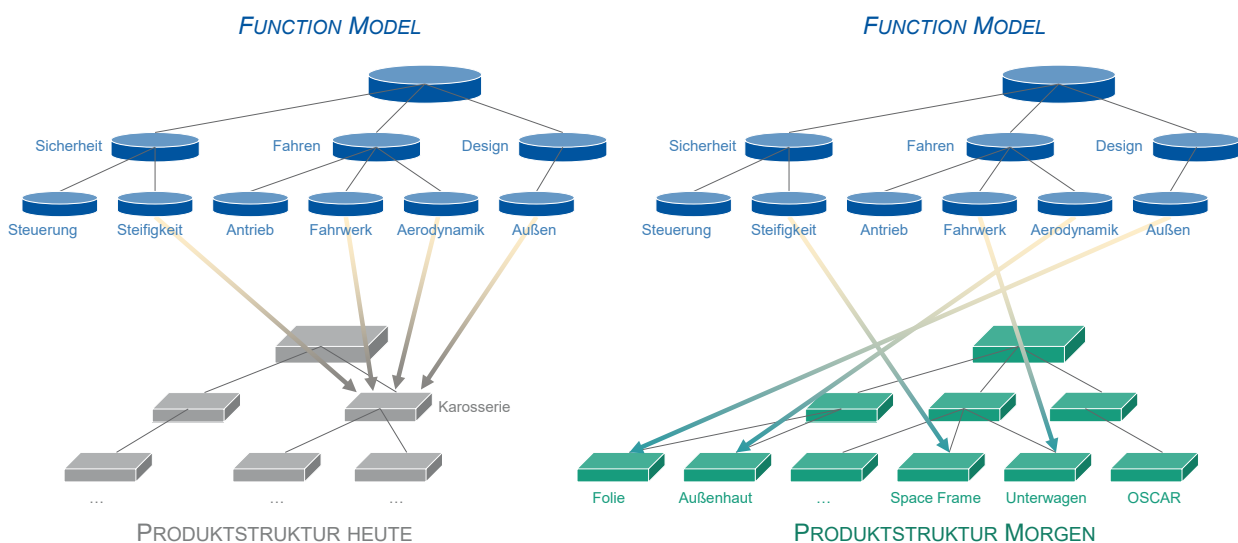


Abbildung 3: Veränderung des Verhältnisses von Function Model und Produktstruktur

Ebenfalls im *Function Model* findet ein Wandel von den Free Features hin zu Produktfunktionen statt, die auf einer modellbasierten Plattform aufbauen. Hierbei lassen sich auf

Basis standardisierter Teile verschiedene Produktvarianten produzieren. Dadurch werden sowohl Nachhaltigkeitspotenziale und Kostenpotenziale erschlossen, als auch die Beherrschung der Komplexität verbessert [33]. Um die Vorteile der neuen Produktmodularität zu nutzen, müssen Unternehmen ihre Produktentwicklung und das Produktdesign anpassen.

Die konkrete Entwicklung und Optimierung eines modellbasierten Plattformdesigns basiert auf dem 6R-Konzept (recover, reuse, recycle, redesign, reduce und remanufacture). Das 6R-Konzept beinhaltet die sechs Stufen des Lebenszyklus von Materialien, die darauf abzielen das Produkt und dessen Design nachhaltig über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu gestalten. Die neue Produktarchitektur muss so gestaltet sein, dass es Kernmodule gibt. Diese bilden als Living Standards die Basis für eine Modularität über mehrere Lebenszyklen. Aufbauend auf den Living Standards werden Module für Funktionsupgrades, Leistungs- und Wertupgrades sowie Produktupdates entsprechend ihrer Lebensdauer angeordnet. Das Konzept zielt darauf ab, dass Module und Rohstoffe nach dem ersten Lebenszyklus zurückgewonnen werden und wiederverwendet werden. Hierbei ist es wichtig zu beachten, dass das Produktdesign funktional und ressourceneffizient ausgelegt werden muss. Zudem muss durch die differentiale Produktstruktur und die modellbasierte Produktplattform das Produktdesign eine einfache Montage und Wiederaufarbeitung gewährleisten. Der Schritt *reduce* fokussiert sich darauf den Ressourcen- und Energieeinsatz sowie den Abfall in einem Produktlebenszyklus zu minimieren. In dem Schritt *recover* werden die Produkte die das Ende ihres Lebenszyklus erreicht haben zurückerlangt. Anschließend werden in dem Schritt *reuse* Module oder Teile zurückgewonnen, damit diese in der gleichen Produktart wiederverwendet werden. Der Schritt *recycle* wirkt unterstützend auf *reuse* ein, indem Rohstoffe wiedergewonnen werden, die auch in anderen Produkten wiederverwendet werden. *Redesign* hat zum Ziel, das alte Produkt so zu überarbeiten, dass man ein neues Produkt erhält. Im Schritt *recover* wird ein defektes Produkt oder ein Produkt, das am Ende seines Lebenszyklus steht, wiederaufbereitet. Hierdurch wird das Produkt wieder in einen neuartigen Zustand gebracht und dessen Lebenszyklus wird verlängert. Dies stellt eine zu bevorzugten Alternative zu den Stufen *reuse* und *recycle* dar [35].

Das Unternehmen *MTA Gerüstbau* setzt in ihrer Unternehmensstrategie einen großen Wert auf Produktinnovationen. Hiermit zielt das Unternehmen darauf ab, die Produkte nachhaltig und klimaneutral zu gestalten. Vor diesem Hintergrund wurde das Prinzip der neuen Produktmodularität erfolgreich in das Produktportfolio übernommen und ist damit im Nachhaltigkeitskern des Quadranten Produktarchitektur anzuordnen. Ein konkretes Beispiel für solch ein Produkt stellt das Regalsystem *Meta Multifloor* da. Dabei handelt es sich um ein Fachbodenregal, welches nur aus den beiden Modulen Rahmen und Fachboden besteht. Der modulare Produktaufbau des Regals ermöglicht eine beliebige Erweiterung des Regals. Zudem werden unter Verwendung von Zubehör zahllose Varianten wie auch Speziallösungen realisiert, wie beispielweise Schrägbodenregale, Felgenregele oder Regale mit Sichtlagerkästen [35]. Ein weiteres Beispiel für die erfolgreiche Umsetzung der Produktmodularität ist durch einen modularen Laptop von *Framework* gegeben. Dabei handelt es sich um einen Laptop, der explizit darauf ausgelegt worden ist, dass einzelne Teile des Laptops ausgetauscht und ersetzt werden. Der Nutzer kann somit seinen Laptop entweder leistungsfähiger gestalten oder defekte Teile problemlos

tauschen. Aufgrund dieser Charakteristik verfügt diese Laptopart über eine höhere Lebensdauer als das integrative Laptopdesign [36].

Die neue Produktmodularität ist einerseits vorteilhaft für Unternehmen und leistet andererseits einen großen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft. Die Nutzung eines modularen Aufbaus in verschiedenen Produktvarianten ist insofern für ein Unternehmen vorteilhaft, als das ein Unternehmen hierdurch flexibler, schneller und ressourceneffizienter produziert. Ein Anstieg in der Produktion von verschiedenen Produktvarianten führt in der Regel zu einem Trade-off zwischen der Produktvariantenanzahl und der Betriebsleistung. Die Produktmodularität minimiert mit ihren positiven Eigenschaften diesen Trade-off [37]. Dies wird dadurch realisiert, dass die gleichen Module in verschiedenen Produktvarianten verwendet werden, wodurch das Unternehmen Skaleneffekte erzielt. Dadurch wird eine effizientere Produktion ermöglicht. Des Weiteren handelt es sich bei solchen Modulen in der Regel um standardisierte Teile, die in großen Stückzahlen gefertigt werden, wodurch auch die Produktionskosten gesenkt werden. Zusätzlich beeinflusst die Standardisierung solcher Module die Flexibilität des Unternehmens positiv, da hierdurch die Möglichkeit zur Komponentensubstitution besteht [38].

Die differenzielle und „model-based“ Produktarchitektur ermöglicht einen geringeren Energie- und Ressourcenbedarf in der Produktion, wodurch es dem Aspekt der Nachhaltigkeit zuträglich ist. Bei defekten Produkten werden einzelne Module ausgetauscht, um die Funktionsfähigkeit wiederherzustellen und somit die Lebenszeit des Produkts zu erhöhen. Die Verlängerung der Produktlebenszeit führt auch zu einer Reduktion der Abfallmenge. Hierdurch werden zusätzliche Nutzenpotenziale realisiert, indem verhindert wird, dass auf energie- und ressourcenintensive Weise ein neues Produkt hergestellt werden muss. Die Integration von Prozessen zur Wiederaufarbeitung und Reparatur von Produkten fördert die Nachhaltigkeit der Produktmodularität zusätzlich. Das Recycling von Produkten die das Ende ihres Lebenszyklus erreicht haben führt dazu, dass man eine geschlossene Kreislaufwirtschaft erreicht. Hierdurch wird der Einsatz von Primärressourcen reduziert und es wird die Entstehung von Abfall vermieden. Zusätzlich werden bei der Verwendung von recycelten Materialien oder Modulen, im Vergleich zur Produktion von Neuprodukten, weniger Emissionen produziert, da der Energieaufwand hierbei geringer ausfällt. Zusätzlich werden durch die Fokussierung auf einzelne Module Lerneffekte erzielt, wodurch in der Produktion Energie und Ressourcen eingespart werden. Durch die effizientere Gestaltung der Produktion aufgrund des Lern- und Skaleneffekts wird auch der Ausstoß an Treibhausgasen reduziert [33].

Bei der Produktarchitektur in den Dimensionen „Product Structure“ und „Function Model“ handelt es sich um ein bedeutendes Konzept für die zukünftige nachhaltige Entwicklung. Die zahlreichen Vorteile eines neuen modularen Produktaufbaus in Kombination mit einer Kreislaufwirtschaft sind der Entwicklung hin zu einer nachhaltigeren Produktion zuträglich.

5 Handlungsfeld: Innovationsstrategie

Einen Ansatz für langlebige Produkte, die trotzdem den technologischen Fortschritt und Innovationen nicht behindern, liefert die Funktionserweiterung. In der zweiten Produktgeneration trägt die Funktionserweiterung dazu bei den Werterhalt des Produkts zu maximieren. Eine zweite Produktgeneration bezieht sich auf ein verbessertes oder erweitertes Produkt aus der ersten Generation und stellt damit einen inkrementellen Innovation Cycle dar. Im Normalfall erfährt ein Produkt eine Abnutzung im Laufe seines Lebens, dem ein Wertverlust einhergeht. Jedoch wird mittels Funktionserweiterung nicht nur die Abnutzung negiert, sondern hierdurch wird das Produkt auch mit aktuellen, innovativen Eigenschaften ausgestattet. Dies ermöglicht nicht nur, dass das Produkt über den gleich Wert wie zum Zeitpunkt des Kaufs verfügt, sondern den gleichen Wert wie ein neueres Produkt zum Zeitpunkt der Funktionserweiterung hat. Somit entspricht der Wert eines geupgradeten Produktes nicht dem eines Neuprodukts aus der gleichen Generation, sondern sogar dem eines Neuprodukts aus der neueren Generation. Hierdurch wird gewährleistet, dass das Produkt nicht nur auf die Funktionen zum Verkaufszeitpunkt limitiert ist, sondern in der Zukunft beliebig besserbar ist. Dies drückt sich in der Systems Innovation aus, die Innovationen von Subsystemen bis zum gesamten System gliedert. In diesem Zusammenhang ist der modulare Produktaufbau von hoher Bedeutung, da dies die Möglichkeit bietet, mit geringem Aufwand, in Subsystemen diese Änderungen in dem Produkt zu implementieren und dadurch Verbesserungen zu erzielen. Dadurch wird das Konzept, dass ein Produkt nur über eine fixe Funktionsausstattung verfügt, verabschiedet [39].

Die Unternehmen *Fairphone* und *Shift* nutzen bereits das Konzept des modularen Produktaufbaus, um dadurch eine Funktionserweiterung und einen Werterhalt in deren Produkt zu gewährleisten. Beide Unternehmen bieten Smartphones an, die nicht verklebt worden sind. Dadurch wird der modulare Produktaufbau sichergestellt und einzelne Module wie Akku, Kamera und Bildschirm können mit geringem Aufwand ausgetauscht werden. Der Austausch einzelner Module ermöglicht es dem Nutzer Funktionen des Smartphones inkrementell und in Subsystemen zu erweitern und dadurch dessen Wert mit Innovationen zu erhalten. Hierdurch sparen einerseits der Nutzer, da die Module günstiger sind als der Preis eines komplett neuen Smartphones. Auf der anderen Seite werden Ressourcen eingespart, was dem Aspekt der Nachhaltigkeit zuträglich ist [40].

Des Weiteren stellt der modulare Fahrzeugaufbau des Shuttle META von der *e.Volution GmbH* ein gutes Beispiel für diese Thematik dar (siehe Abbildung 4). Der modulare Aufbau des Fahrzeugs bietet die Vorteile, dass es hierdurch besonders langlebig und auch erneuerbar ist. Neben dem Fahrzeugkonzept sowie der kapitalarmen und energieeffizienten Produktion in den MicroFactories wird das Fahrzeug in einem innovativen Prozess in der Re-Assembly Upgrade Factory wiederaufbereitet. Nach jedem Re-Assembly-Einsatz entspricht die Fahrzeugqualität der eines Neuwagens zum aktuellen Zeitpunkt und verlängert so die Einsatzdauer des einzelnen Fahrzeugs. Genutzte Komponenten werden geprüft und bei Bedarf aufbereitet. Falls keine Neuteilqualität zu erzielen ist oder der Energie- und Ressourcenbedarf höher als für die Neuteilproduktion ist, werden Neuteile verarbeitet. Dies trägt dazu bei, dass der übliche Kreislauf einer Produktnutzung deutlich verlangsamt wird. Durch Umsetzung dieses Konzepts ermöglicht die *e.Volution GmbH* eine Lebensdauer von bis zu 50 Jahren und erzielt eine Ressourcenschonung innerhalb des Kreislaufsystems [41].

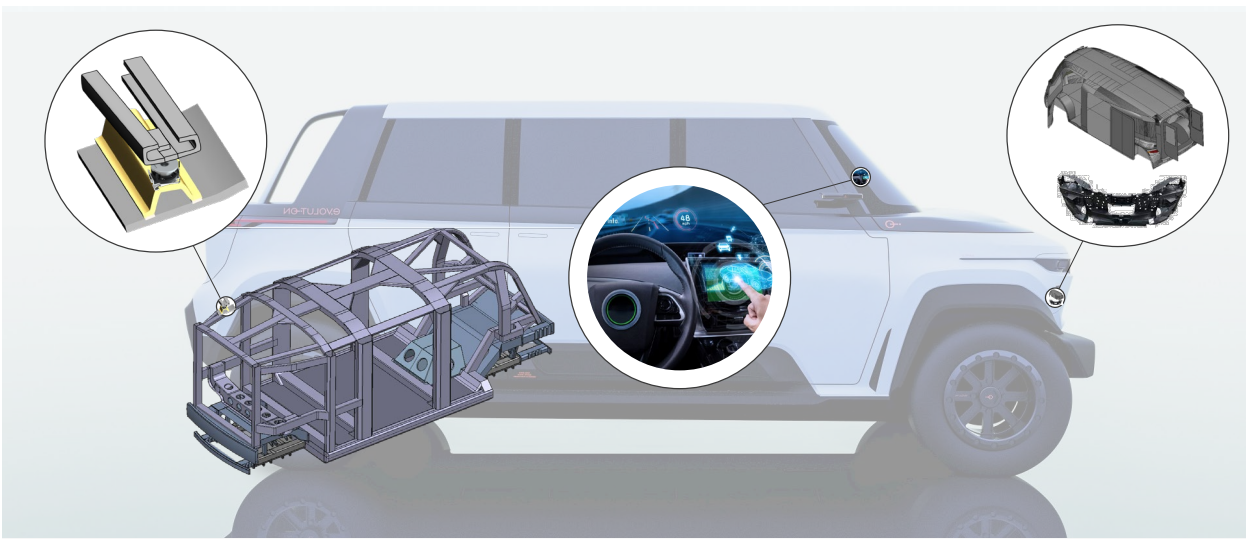


Abbildung 4: Modulare Fahrzeugaufbau des Shuttle META von der e.Volution GmbH (Quelle: e.Volution GmbH)

Das Prinzip der Funktionserweiterung und Werterhaltung durch inkrementelle Innovationen der Subsysteme birgt viele Vorteile hinsichtlich der Nachhaltigkeit. Dieses Prinzip ist mit einem modularen Produktaufbau gekoppelt, um den Prozess der inkrementellen Innovation zu ermöglichen beziehungsweise zu vereinfachen (siehe Abbildung 5). Dadurch das in diesem Prinzip die Möglichkeit geboten wird, einzelne Module in einem Produkt weiterzuentwickeln, wird der Ressourcenbedarf minimiert und die Lebensdauer im Vergleich zum herkömmlichen Produkt maximiert. Dabei nimmt bei einem herkömmlichen Produkt über die Produktlebensdauer der Kundennutzen bis zum End-of-life ab. Durch inkrementelle Innovation über die gesamte Lebensdauer des Produktes wird immer wieder der Kundennutzen gesteigert. So verlängert sich die Produktlebensdauer und ohne dabei auf Innovationen zu verzichten. Für den Nutzer besteht kein Bedarf darin ein teures Neuprodukt zu kaufen um innovative Funktionen zu erhalten. Hierdurch werden auch Ressourcen und Energie eingespart, die ansonsten mit der Neuproduktion verbunden wären, da circa 80 % der Umweltauswirkungen eines Produkts auf die Designphase zurückzuführen sind [42].

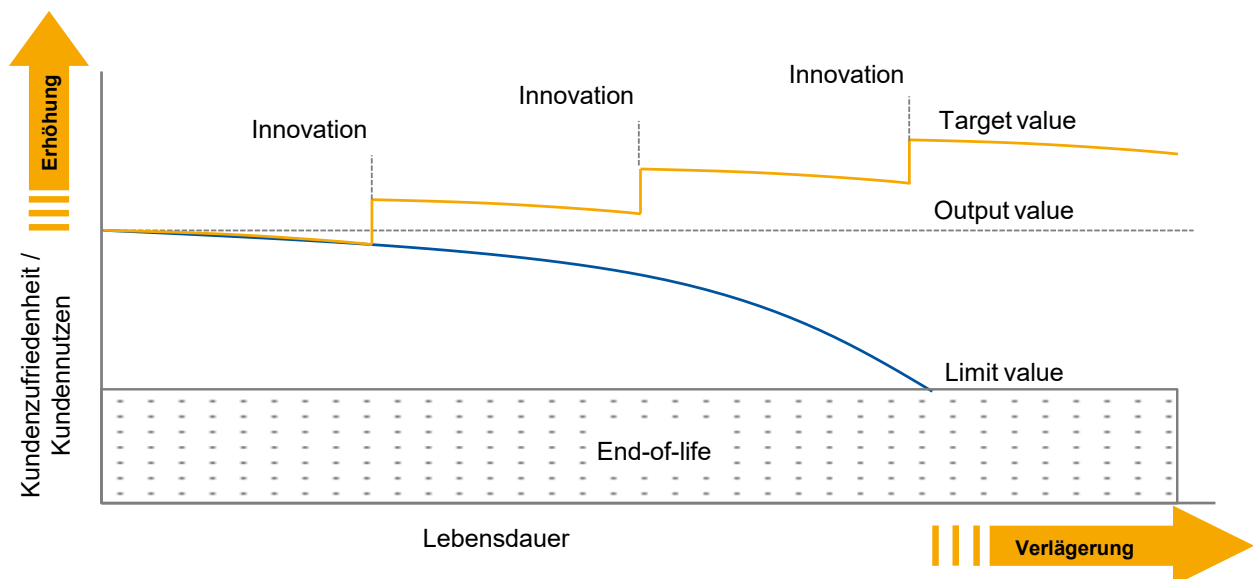


Abbildung 5: Inkrementelle Innovation und Wertsteigerung mittels Upgrades

Auch der damit einhergehende Ausstoß von Schadstoffen wird reduziert. Die Lebensdauererweiterung wird dadurch gewährleistet, dass funktionskritische Module ersetzt werden können. Der Austausch von Modulen ist zusätzlich vorteilhaft, indem hierdurch auch die Entstehung von Abfall reduziert wird. Dieser Vorteil wird noch weiter ausgebaut, wenn dieses Prinzip in einer Kreislaufwirtschaft integriert wird. Module oder Subsysteme, die gegen Innovationen ausgetauscht worden sind, werden genutzt um Rohstoffe und Materialien zu gewinnen. Diese werden anschließend in anderen Produkten weiterverwendet. Der Prozess der Wiederverwendung ist der Produktionseffizienz zuträglich.

6 Handlungsfeld: Geschäftsmodell

Geeignete Geschäftsmodelle sind unabdingbar für die Einführung einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft. Auf Basis von Geschäftsmodellen werden langfristige Strategien definiert und verfolgt sowie die Ressourcen des Unternehmens zielgerichtet eingesetzt werden. Jedes Geschäftsmodell muss individuell an die Gegebenheiten des Unternehmens angepasst werden und muss das nachhaltige Ziel des Unternehmens widerspiegeln. Zudem muss die darin enthaltene Strategie klar definiert sein, um ein zielgerichtetes Handeln sicherzustellen. Somit hat auch ein geeignetes Geschäftsmodell die langfristige Nachhaltigkeit zum Ziel. Dabei werden Aspekte der Klimafreundlichkeit kurzfristigen Gewinnen übergeordnet.

Eine wertsteigernden Kreislaufwirtschaft stützt sich auf die drei Grundsätze Funktions- und Wertsteigerung, zirkulärer Fluss von Materialien und Produkten sowie die Wiederherstellung der Natur [32]. Dies wird durch einen möglichst effizienten Ressourceneinsatz umgesetzt, damit diese in einem geschlossenen Kreislauf wiederverwendet werden. Anstatt das Materialien und Produkte nach einmaliger Verwendung weggeworfen oder nicht ausreichend ausgelastet werden, werden sie so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet und geupgradet. Durch diese Arten des Shared Use wird der Lebenszyklus eines Produkts verlängert und die Ressourcennutzung möglichst effizient gestaltet. Dadurch werden Abfälle minimiert und Ressourcen sowie Materialien verbleiben solange wie möglich in der Kreislaufwirtschaft [42]. Ein solch verminderter Einsatz von Primärrohstoffen reduziert den Ausstoß von Abgasen in Deutschland um bis zu 5,5 Mio. Tonnen, was sich wiederum positiv auf die Umwelt auswirkt [43]. Zur erfolgreichen Umsetzung sind die richtigen Geschäftsmodelle zu wählen, die auf den Elementen *Subscription* und *Shared Use* aufbauen. Die Geschäftsmodelle werden im Framework for Circular Production Economy daher in die zwei Dimensionen *Benefit Sharing* und *Usability* gegliedert.

Besonders nachhaltige Geschäftsmodelle des *Benefit Sharings*, in denen Produkte besonders effizient in *Shared Use* genutzt werden, sind das Sharing Economy Modell und das Leasing Modell. Das Sharing Economy Modell stellt ein mögliches Geschäftsmodell zur Umsetzung einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft dar. Dieses Modell beschreibt eine sozioökonomische Plattform, die es den Nutzern ermöglicht Güter, Dienstleistungen und Informationen untereinander zu teilen (*Shared Use*). Anstatt das nun beispielweise ein Produkt kostenintensiv erworben werden muss (*Single Use*), wird dies zu einem günstigeren Preis unter den Nutzern der Plattform geteilt. Hierbei wird ein Produkt oder eine Dienstleistung zwischen mehreren Nutzern geteilt. Beim Carsharing handelt es sich um einen populären Vertreter dieses Modells. Das Sharing Economy Modell bietet ein großes Nachhaltigkeitspotenzial, da Unternehmen oder auch Privatpersonen, die Produkte nicht häufig benötigen, sich diese leihen können. Die gemeinsame Nutzung führt dazu, dass weniger Produkte produziert und somit auch weniger Ressourcen verwendet werden

müssen. Zudem bieten sich dem Nutzer die Vorteile, dass das Ausleihen günstiger ist und auch dessen Flexibilität in der Nutzung solcher Produkte erhöht [44].

Im Leasing-Modell wird das Recht auf Nutzung eines Produktes an ein Unternehmen oder eine Privatperson für einen bestimmten Zeitraum zu einem festen Preis übertragen [45]. Nach diesem Zeitraum kann das Produkt auf Wunsch durch ein neues ausgetauscht werden. Damit ist es auf der Achse *Benefit Sharing* deutlich im Bereich *Subscription* einzuordnen. Ein Beispiel für die Anwendung dieses Modells stellt das Unternehmen *MIL Maschinen- & Industrieanlagen-Leasing AG* dar. Sie stellen ihren Kunden solche Leasingleistungen für einen bestimmten Zeitraum zur Verfügung [46]. Dieses Modell ermöglicht den Nutzern einen gezielteren Einsatz von Ressourcen. Zusätzlich wird gewährleistet, dass nur die Ressourcen genutzt werden, die auch tatsächlich benötigt werden.

Im Product-Service-System Modell, als ein Subscription Benefit Sharing Modell, wird die Lebenszeit von Produkten durch gezielten Servicetätigkeiten des Herstellers optimiert. Im Kern steht ein Netzwerk aus Sachprodukten sowie Serviceprodukten von Akteuren und einer unterstützenden Infrastruktur zur Erfüllung von Kundenwünschen. Im Rahmen dieses Modells bietet ein Unternehmen seinen Kunden ein Produkt und die damit verbundenen Servicetätigkeiten an [47]. *Philips Lighting* verfolgt mit ihrer Beleuchtung unter anderem das Product-Service-System Modell. Das Unternehmen bietet die Beleuchtung nicht nur als Produkt an, sondern offeriert auch zugehörige Dienstleistungen wie beispielsweise Instandhaltungen, Kontrollen und Systemoptimierungen [48]. Dieses Modell leistet einen Beitrag zur Nachhaltigkeit, indem die gezielten Servicetätigkeiten des Herstellers die Lebenszeit ihrer Produkte optimieren.

Wenn Remanufacturing mit Upgrades und Updates kombiniert wird, werden Funktionserweiterungen und Wertsteigerungen ermöglicht. Durch den Einsatz von Upgrades und Updates werden Remanufacturing-Prozesse dazu genutzt, um alte Produkte auf den neuesten Stand der Technik zu bringen. Zum Beispiel könnte ein Computer, der nicht mehr auf dem neuesten Stand ist, durch den Austausch von Komponenten wie dem Prozessor oder der Festplatte aufgerüstet werden, um eine bessere Leistung zu erzielen. Dadurch wird die Funktion des Produkts erweitert und seine Wertsteigerung erhöht. Ein weiterer Vorteil von Upgrades und Updates im Zusammenhang mit Remanufacturing ist, dass sie es Unternehmen ermöglichen, Produkte an neue Kundenmärkte anzupassen. Wenn beispielsweise ein bestimmtes Produkt nicht mehr gefragt ist oder der Markt gesättigt ist, wird es durch Upgrades und Updates an die Bedürfnisse eines neuen Marktes angepasst. Schließlich tragen Upgrades und Updates im Zusammenhang mit Remanufacturing auch dazu bei, die Lebensdauer von Produkten zu verlängern. Wenn ältere Produkte aufgerüstet werden, sind sie in vielen Fällen genauso effektiv wie neue Produkte. Auf diese Weise verlängern Unternehmen den Lebenszyklus ihrer Produkte und reduzieren die Menge an Abfall, die durch die Entsorgung von veralteten Produkten entsteht.

Jedes Geschäftsmodell bietet individuelle Vorteile, jedoch verfügt jedes Modell auch über individuelle Limitationen und lässt sich deshalb nicht in jeder Situation anwenden. Die Modelle Sharing-Economy und Leasing basieren beide auf dem Prinzip des Leihens von Produkten. Die Sharing-Economy ist vorteilhaft, wenn ein Unternehmen kurzfristig und flexibel Produkte leihen möchte, wohingegen das Leasing langfristiger ausgelegt ist (Subscription). Die Modelle nutzen das Prinzip der Wiederverwendung von Rohstoffen und Materialien (Shared Use). All dieses Modelle haben zum Vorteil, dass die Wiederverwendung von Rohstoffen den Bedarf an nicht-nachhaltigen Ressourcen reduziert und auch den entstandenen Abfall reduziert [32]. Wenn möglich bietet sich bei den Modellen das Upgrade als erstes an, da hierbei eine Funktions- und Wertsteigerung erreicht wird. An-

dernfalls wird auf die beiden anderen Modelle zurückgegriffen. Das Produkt-Service-System Modell bietet sich an, wenn sich ein Unternehmen ein Produkt anschaffen möchte bei einer optimalen Ausnutzung dessen Lebenszeit. Basierend auf den Vorteilen der Circular Production Economy und den zugehörigen Geschäftsmodellen wird deren Bedeutung für die Zukunft eindeutig hervorgehoben. Jedoch ist es notwendig, diese Geschäftsmodelle noch weiter zu entwickeln und anzupassen, um diese in möglichst vielen Bereich einzusetzen. Dies reicht aber nicht aus, die Unternehmen müssen vor dem Aspekt der Nachhaltigkeit ihre Perspektive zur Bewertung der Produktion anpassen. Es muss eine Erweiterung der Bewertungsdimensionen von einer reinen finanziellen Perspektive auf ökologische, soziale und steuernde Dimensionen vollzogen werden. Entscheidend ist, dass diese Perspektiven keine konträren Ziele beschreiben, sondern durch eine wertsteigernde Kreislaufwirtschaft ganzheitlich adressiert werden und letztendlich in einem betriebswirtschaftlichen Vorteil für Unternehmen resultieren.

7 Handlungsfeld: Wertschöpfungsstrategie

Zur Realisierung der neuen Produktmodularität braucht es nicht nur neue Entwicklungs- und Designstrategien, sondern auch industrialisierte Strukturen, um komplexe Massenprodukte wie Autos, Haushaltsgeräte, Maschinen und Anlagen systematisch für ein zweites, drittes oder viertes Leben aufzurüsten, ohne dass Kunden auf die gesteigerte Leistung und Attraktivität neu entwickelter Produkte verzichten müssen. Die Wiederaufbereitung und Reparatur von technologischen Endprodukten hat aufgrund der ständigen Neuentwicklung und Produktion dieser technologischen Endprodukte in den letzten 20 Jahren signifikant abgenommen. Kunden entscheiden sich meist aufgrund einer Neuanschaffung des gleichen oder eines ähnlichen Produkts gegen die Reparatur eines technologischen Endprodukts. [49] Zu hohe Reparaturkosten oder ein nicht zu reparierendes oder zu altes Endprodukt stehen als Gründe gegen eine Reparatur ungefähr gleichauf an erster und zweiter Stelle. Erste Ansätze von Unternehmen, ihre technologischen Endprodukte gezielt und damit industrialisiert wieder auf den Markt zu bringen, stellen bisher eher isolierte Ansätze im Sinne der Upgrade Circular Economy dar [51].

Die Industrialisierung von Wiederaufbereitungsprozessen ist bisher auf wenige Wirtschaftszweige beschränkt und begrenzt sich technologisch auf die Wiederaufbereitung von Primärstoffen und Materialien, die in ihrer Rohform zu Beginn des Produktlebenszyklus eingesetzt werden. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Primärmaterialien wie Kunststoffe und Metalle. Die Wiederaufbereitung von technologischen Endprodukten beschränkt sich bisher auf Insellösungen und Nischenprodukte. [51]

Für einen sinnvollen Paradigmenwechsel hin zu einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft bedarf es umfassendere Maßnahmen als diese isolierten Ansätze zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs. Eine Re-Assembly Fabrik ist eine Produktionsstätte, die sich auf den Zusammenbau gebrauchter oder recycelter Teile und Komponenten zu neuen Produkten spezialisiert hat. Der Prozess umfasst mehrere Stufen. Zunächst erfolgt die Sortierung und Demontage bei der die gebrauchten Produkte nach Typen sortiert und in ihre Einzelteile zerlegt werden. Anschließend erfolgt die Reinigung und Aufarbeitung. Hier werden die Teile gereinigt und aufgearbeitet, um sicherzustellen, dass sie in gutem Zustand und für die Wiederverwendung geeignet sind. Danach ist das eigentliche Re-Assembly möglich. Die Teile werden mit Spezialwerkzeugen und -geräten wieder zu neuen Produkten zusammengebaut. Abschließend erfolgt die Qualitätskontrolle. Die fertigen Produkte werden inspiziert und getestet, um sicherzustellen, dass sie die erforderlichen

Qualitätsstandards erfüllen. Ein mögliches Layout für eine Re-Assembly Fabrik ist in Abbildung 6 dargestellt.

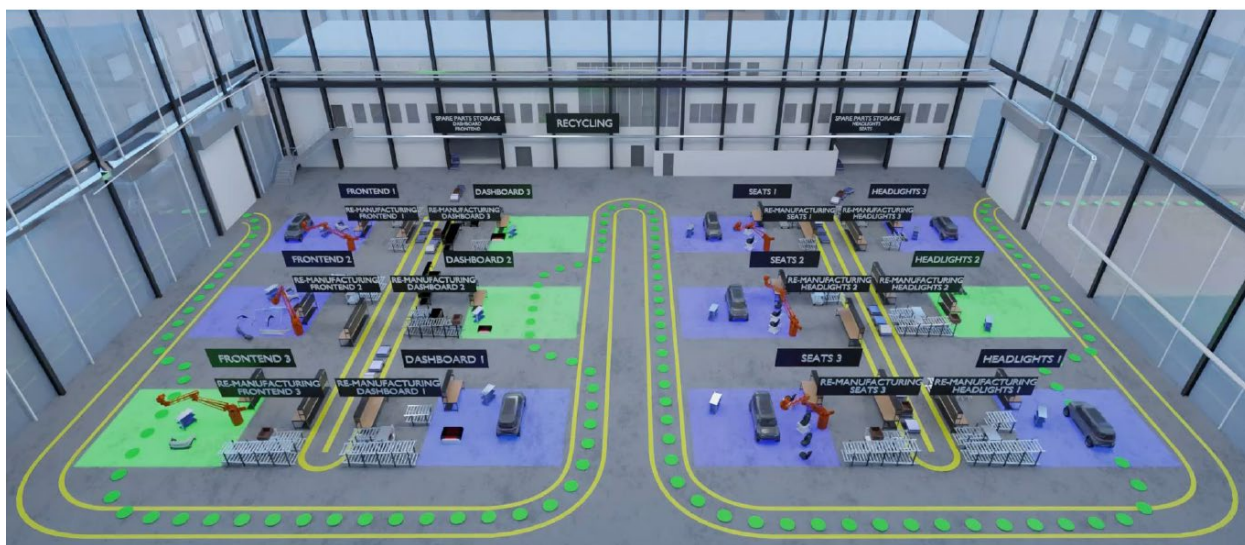


Abbildung 6: Materialfluss und Stationen in einer Re-Assembly Fabrik

Um dies zu erreichen, ist es notwendig, Funktionserweiterungen, also Upgrades, im Re-Produktionsprozess zu berücksichtigen. Re-Assembly-Upgrade-Prozesse sind in der Lage bis zu 90 % der Material- und Umweltbelastung von Neuprodukten einzusparen und die Wertschöpfung pro Mitarbeiter, z. B. in der Fahrzeugproduktion, um etwa 30-60 % erhöhen.

Auf den ersten Blick scheint die Produktaufbereitung nur für Produkte mit einem hohen Materialwert und hohen anfänglichen Produktions- und Entwicklungskosten wirtschaftlich zu sein, wie z. B. Flugzeugturbinen oder Kreuzfahrtschiffe. Um auch die Aufbereitung und Funktionsverbesserung von Produkten mit geringerem Wert zu ermöglichen, ist ein deutlich höherer Industrialisierungsgrad notwendig. Dies führt zu einer höheren Auslastung der Ressourcen und ermöglicht ähnliche Skalenerträge wie die Neuproduktion. Die Industrialisierung erfordert jedoch eine Trennung von Planung und Ausführung der notwendigen Aktivitäten. Dies wird durch die Ungewissheit über den Zustand und die Menge der zurückkehrenden Produkte erschwert. Detaillierte Informationen über die benötigte Arbeitszeit und die benötigten Ersatzteile bei der Aufbereitung liegen erst nach der Inspektion der Rückläufer vor, so dass eine Feinplanung der Produktion erst ab diesem Zeitpunkt erfolgt. Die daraus resultierenden Informationsasymmetrien führen zwangsläufig zu höheren Lagerbeständen, Prozesskosten und längeren Durchlaufzeiten.

Wenn Produkte mit kurzer Lebensdauer in einem linearen Wirtschaftssystem mit kurzfristigen Planungshorizonten hergestellt werden, führt dies zu Produktionsprozessen und Gebäuden, bei denen die kurzfristige Wirtschaftlichkeit in den meisten Fällen Vorrang vor der Nachhaltigkeit hat. Obwohl regulatorischer und gesellschaftlicher Druck die Hersteller zu nachhaltigeren Praktiken antreibt, besteht oft Unsicherheit darüber, wo die größten Potenziale in der Produktion liegen und welche Maßnahmen notwendig sind, um sie zu erschließen. Um dem entgegenzuwirken, bedarf es einer größeren Transparenz des Ressourcenverbrauchs, sowohl in Bezug auf die Menge als auch auf den Standort, sowie der langfristigen Fähigkeit, Gebäude immer wieder an neue Gegebenheiten anzupassen. Darüber hinaus tragen neue oder veränderte Messgrößen dazu bei, Investitionsentscheidungen in Richtung nachhaltigerer Lösungen zu lenken.

Potentielle Informationsasymmetrien der industriellen Wiederaufbereitung werden durch die Einrichtung von lebenszyklusübergreifenden Datenstrukturen wie der digitalen Produktakte aufgelöst. Dieser Datensatz verbindet akteurübergreifend Daten aus der Entwicklungsphase (Stückliste, Schnittstellen etc.), der Produktion (Bauteileigenschaften, Prozessparameter etc.) und den verschiedenen Nutzungsphasen (Betriebsdauer, Belastungsprofile etc.). Um dies zu erreichen, ist eine klare Identifizierung der relevanten Baugruppen und Module sowie ein einfacher Zugriff auf die Daten erforderlich.

Die industrielle Wiederaufbereitung wird oft noch nicht so automatisiert und industrialisiert wie die Erstproduktion des technologischen Endprodukts. Ein Beispiel ist das aufwändige Entfernen von "nicht lösbaren" materialschlüssigen Schrauben oder Nieten. Neue zeit- und ressourcensparende Verfahren, wie die adaptive Automation, müssen entwickelt und erprobt werden: Dies ist der Schlüssel zur Industrialisierung von Wiederaufbereitungsprozessen für technologische Endprodukte.

8 Befähiger: KI-basiertes Lifecycle Management

Das Produkt Lifecycle Management (PLM) ist ein wissensintensiver Prozess, der Markt Analysen, Produkt Design und Entwicklung, aber auch Produktion, Prozessentwicklung, Produktvertrieb, Nutzung, Service nach dem Verkauf sowie Wiederaufbereitung eines technologischen Endprodukts inkludiert [52]. Aufgrund der großen Menge an anfallenden Daten, eignet sich das PLM besonders für den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) bzw. für den Einsatz von untergeordneten Methoden der KI wie z.B. Big Data. Die Verarbeitung von großen Datenmengen, wie sie im PLM anfallen und das Verknüpfen dieser Daten mit Handlungsempfehlungen lassen sich mit KI erfassen und transparent machen. [53] Für jegliche Anwendungen von KI werden zunächst eine aufbereitete Datenmenge und definierte Input und Output Daten benötigt. Bisherige Anwendungen von KI im PLM gruppieren diese Input und Output Daten in die drei Perioden des PLM, Beginning of Life (BOL), Middle of Life (MOL) und End of Life (EOL). Die Input Daten reichen auch in diesem Betrachtungsfeld von Daten zu Kundenanforderungen (z.B. Produktfunktion oder Konfigurationen) bis hin zu Umweltdaten während der Nutzung des Produkts (z.B. Nutzungskonditionen oder Nutzungsdauer) [54]. Die Output Daten hingegen starten mit Daten zu Designspezifikationen wie Materiallisten oder Toleranzen und enden mit Daten zur Demontagemöglichkeit wie z.B. Demontage Kosten oder Recycling Daten. Der Fokus bei der Verarbeitung der Daten liegt auf der Verarbeitung mittels prozesshistorischen Methoden. [55] Für die auf der Prozesshistorie basierende Methoden wird eine große Menge an historischen Prozessdaten benötigt, die in geeigneter Weise annotiert sind. Auch das bisherige PLM bietet dafür eine ausreichende Grundlage, allerdings schließt es mehrere Lebenszyklen eines Produkts bzw. Leben eines technologischen Endprodukts zunächst aus. [56]

In der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft fallen durch die entstehenden neuen Lebenszyklen bzw. Leben eines Produkts weitere Daten zum eigentlichen Produkt, aber auch zur Baugruppe und deren einzelnen Komponenten an. Um die Entscheidung zwischen Funktionserweiterung, Wertsteigerung oder tatsächlichen Ende des Lebenszyklus eines technologischen Endprodukts zu treffen und die dafür ausschlaggebenden Informationen und Daten zu verarbeiten, braucht es auch in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft KI-basiertes Lifecycle Management (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: KI-basiertes Lifecycle Management in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft

Das KI-basierte Lifecycle Management entscheidet in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft basierend auf der Systemkomplexität, in Abhängigkeit zum aktuellen Produktwert und zur Produktlebenszeit des technologischen Endprodukts, in welchen Nutzungszyklus ein Produkt fließen soll. Die Systemkomplexität gibt dabei an, wie komplex das technologische Endprodukt ist, also ob es aus verschiedenen Baugruppen besteht, aus wie vielen und welchen Komponenten sich technologische Endprodukte zusammensetzen und welche Fügeverfahren oder Mechanismen für die Zusammensetzung angewendet wurden. Das KI-basierte Lifecycle Management entscheidet, ob ein Produkt weiterhin in seiner Funktionsebene seines aktuellen Lebenszyklus zirkuliert oder sich in eine neue Funktionsebene begibt und damit ein zweites, drittes oder viertes Leben erhält. Diese Entscheidungsfindung findet auf allen Funktionsebenen statt, so wird nicht nur das technologische Endprodukt selber, sondern auch einzelne Baugruppen innerhalb des Produkts, bis hin zu kleinen Komponenten betrachtet.

Die Infrastruktur produzierender Unternehmen zur gezielten Aggregation und Aufbereitung von Informationen über mehrere Datenquellen hinweg und die Schaffung echtzeitfähiger Entscheidungsgrundlagen für domänenübergreifende Fragestellungen, auch bekannt als „Internet of Production, bildet die Grundlage für eine effizientere und wertsteigernde Kreislaufwirtschaft sowie KI-basiertes LCM (Lifecycle-Management). Um den vollen Nutzen aus diesen Ansätzen zu ziehen, müssen diese weiterentwickelt und implementiert werden. Eine digitale Produktakte (siehe Abbildung 8), die den gesamten Produktlebenszyklus dokumentiert, hilft Unternehmen einen umfassenderen Überblick über ihre Produkte zu erhalten und bessere Entscheidungen zu treffen, indem sie Transparenz und Rückverfolgbarkeit von Produkten ermöglicht. Grundsätzlich gelten für die Entwicklung der digitalen Produktakte hohe Anforderungen an die präzise Dokumentation der Prozesse und damit verknüpften Daten, die kontinuierliche Echtzeitdokumentation aber auch die Garantie der Fälschungssicherheit der aufgenommenen Daten.

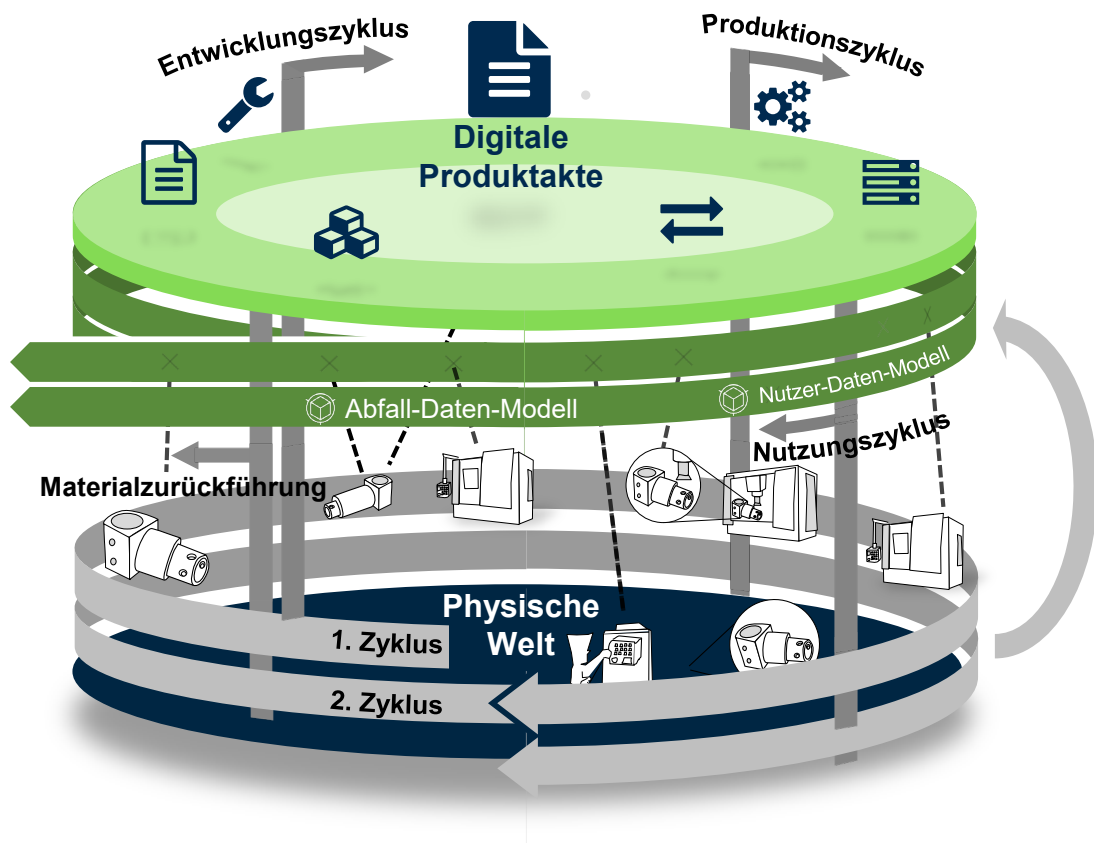


Abbildung 8: Digitale Produktakte in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft

Für die wertsteigernde Kreislaufwirtschaft wird der digitale Schatten um die digitale Produktakte erweitert. Der digitale Schatten stellt damit in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft ausschließlich die Verbindung zwischen der physischen Welt und der digitalen Produktakte dar. Die digitale Produktakte wird zunächst mit Informationen des Produktdatensatzes wie Materialdaten, Teilelisten oder auch Reparaturanleitungen in den Entwicklungszyklus gespeist. Übergehend in den Produktionszyklus werden anschließend Demontage bzw. Remontage Anleitungen, aber auch Nutzerdaten und Daten zur Produkthistorie gespeichert. Zusätzlich kommt in der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft die Daten zu Vorgänger- und Nachfolgerkomponenten hinzu. Die Speicherung dieser Daten

ist die Befähigung zu mehreren Nutzungszyklen einzelner Produkte, aber auch ihrer Bauteile und einzelnen Komponenten.

Entscheidend für die KI-basierte Verarbeitung der Lebenszyklusdaten der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft ist diese digitale Produktakte, welche alle Lebenszyklusdaten speichert und nicht wie für das konventionelle PLM zwischen den unterschiedlichen Phasen des PLM, BOL, MOL und EOL unterscheidet. Diese Phasen gehen für das PLM der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft in einander über und sind auch für die einzelnen Baugruppen und Komponenten eines Endproduktes unterschiedlich. Abbildung 9 zeigt den benötigten Informationsfluss während des Lebenszyklus der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft und die daraus entstehende Cloud basierte Emergenz-Evaluation.

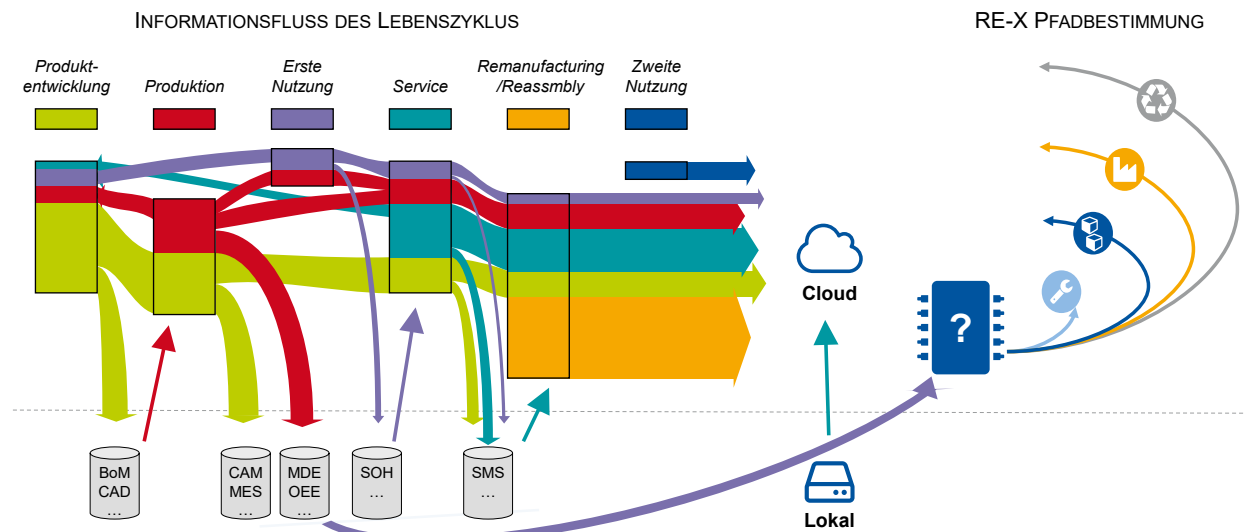


Abbildung 9: Informationsfluss des Lebenszyklus und Cloud basierte Emergenz-Evaluation

Die zentrale Open-Source Cloud sammelt alle Daten, die für eine Klassifizierung und Identifizierung des nachhaltigen Re-X Pfadbewertung benötigt werden (d.h. Reassembly, Remanufacturing etc.) benötigt werden. Zu unterscheiden ist hier, dass der Datenfluss mit der ersten Nutzung nicht aufhört, sondern eine zweite, dritte oder vierte Nutzung des Endproduktes, seiner Baugruppen oder Komponenten an den Service anschließt. Dies muss sich auch in der Speicherung und Verarbeitung der Daten widerspiegeln. Entschieden wird dann zwischen den möglichen Weiterverarbeitungsprozessen für das Endprodukt, seiner Baugruppe oder einzelnen Komponenten.

Durch den Einsatz von KI-basiertem Lifecycle Management überwachen und bewerten Unternehmen den Lebenszyklus ihrer Produkte, Komponenten, Materialien und Prozesse. Dadurch sind sie in der Lage wert- und funktionssteigernde Maßnahmen rechtzeitig und optimal zu identifizieren und umsetzen, um die Effizienz und Rentabilität zu steigern und gleichzeitig die Umweltauswirkungen zu minimieren. Die Anwendung von KI ermöglicht eine präzisere Analyse von Daten und eine schnellere Entscheidungsfindung auf Grundlage von automatisch generierten Erkenntnissen und Vorhersagen. Entscheidend ist dabei die Entwicklung einer digitalen Produktakte in einem Internet of Sustainable Production, als Weiterentwicklung des Internet of Production, welches die Datenbasis für das KI-basierte Lifecycle Management speichert, aktualisiert und zur Verfügung stellt.

9 Zusammenfassung

Unternehmen stehen unter einem enormen Druck, ihre Produktion vollständig nachhaltig auszurichten, da eine breite Öffentlichkeit aus Politik, Kunden und Gesellschaft nicht mehr nur eine weitere Effizienzsteigerung der Produktion verlangt, sondern auch Prozesse und Produkte fordert, die keine negativen Umweltauswirkungen haben. Dafür bedarf es neuer Ansätze, die das Verständnis von nachhaltiger Produktion um das der wertsteigernden Kreislaufwirtschaft erweitern. So werden neue Aspekte betont, damit langlebige Produkte mittels Funktionserweiterung profitabel am Markt angeboten werden. Zudem müssen Unternehmen ihre Strategie auf dieses neue Verständnis ausrichten. Produktarchitektur, Geschäftsmodelle, Innovations- und Wertschöpfungsstrategie können auf die Charakteristika einer wertsteigernden Kreislaufwirtschaft aligniert werden. Dadurch wird es möglich, Produkte zu entwickeln, die mittels differentialer Modulbauweise in der Lage sind eine modellbasierte Plattform für verschiedene Funktionalitäten anzubieten. Zudem wird in kurzen, inkrementellen Innovationszyklen eine kontinuierliche Verbesserung der Teilsysteme eines Produktes erreicht. Unterstützt wird dieses Vorgehen durch eine subscriptionsbasierte Kundenbeziehung, bei der Produkte mit anderen Nutzer geteilt werden. Dabei wird die Wertschöpfung von der eigentlichen Produktion auf den Betrieb der Produkte erweitert. Durch einen solchen Betrieb wird zusätzlich die Wiederverwendung der Produkte über eine lange Lebensdauer ermöglicht und motiviert. Damit dies informationstechnisch abgebildet werden kann, wird außerdem ein global vernetztes Internet of Sustainable Production benötigt.

10 Literatur

- [1] The Intergovernmental Panel on Climate Change. „Global Warming of 1.5 °C: Special Report.” ipcc.ch. <https://www.ipcc.ch/sr15/> (Zugriff am: 19. Feb. 2023).
- [2] „Übereinkommen von Paris,” Vereinte Nationen, 2015. Zugriff am: 19. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf
- [3] Climate Watch. „Historical GHG Emissions.” climatewatchdata.org. <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions> (Zugriff am: 1. Jan. 2023).
- [4] SHIFT. „Shift.” shiftphones.com. <https://www.shiftphones.com/> (Zugriff am: 3. Feb. 2023).
- [5] D. Hariyani, S. Mishra, P. Hariyani und M. K. Sharma, „Drivers and motives for sustainable manufacturing system,” *Innovation and Green Development*, Jg. 2, Nr. 1, Art.-Nr. 100031, 2023, doi: 10.1016/j.igd.2022.100031.
- [6] I. Gödl-Hanisch und M. Menkhoff, „Inwieweit geben Unternehmen die gestiegenen Einkaufspreise an ihre Kunden weiter?,” *ifo Schnelldienst*, Jg. 75, Nr. 12, S. 32-34.
- [7] D. S. Jacks, „From boom to bust: a typology of real commodity prices in the long run,” *Cliometrica*, Jg. 13, Nr. 2, S. 201–220, 2019, doi: 10.1007/s11698-018-0173-5.
- [8] M. Zarte, A. Pechmann und I. L. Nunes, „Decision support systems for sustainable manufacturing surrounding the product and production life cycle – A literature review,” *Journal of Cleaner Production*, Jg. 219, S. 336–349, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.092.
- [9] European Commission. „Circular economy action plan.” environment.ec.europa.eu. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en (Zugriff am: 3. Feb. 2023).
- [10] M. T. Lee und R. L. Raschke, „Stakeholder legitimacy in firm greening and financial performance: What about greenwashing temptations?,” *Journal of Business Research*, Jg. 155, Part B, Art.-Nr. 113393, 2023, doi: 10.1016/j.jbusres.2022.113393.
- [11] A. Nygaard, „From Linear to Circular Economy: a Transaction Cost Approach to the Ecological Transformation of the Firm,” *Circular Economy and Sustainability*, Jg. 2, Nr. 3, S. 1127–1142, 2022, doi: 10.1007/s43615-022-00158-w.
- [12] G. K. Badhotiya, S. Avikal, G. Soni und N. Sengar, „Analyzing barriers for the adoption of circular economy in the manufacturing sector,” *International Journal of Productivity and Performance Management*, Jg. 71, Nr. 3, S. 912–931, 2022, doi: 10.1108/IJPPM-01-2021-0021.
- [13] M. Hina, C. Chauhan, P. Kaur, S. Kraus und A. Dhir, „Drivers and barriers of circular economy business models: Where we are now, and where we are heading,” *Journal of Cleaner Production*, Jg. 333, Art.-Nr. 130049, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130049.
- [14] H. Corvellec, A. F. Stowell und N. Johansson, „Critiques of the circular economy,” *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 26, Nr. 2, S. 421-432, 2021, doi: 10.1111/jiec.13187.
- [15] J. Tan, F. J. Tan und S. Ramakrishna, „Transitioning to a Circular Economy: A Systematic Review of Its Drivers and Barriers,” *Sustainability*, Jg. 14, Nr. 3, Art.-Nr. 1757, 2022, doi: 10.3390/su14031757.

- [16] G. Freisinger, O. Jöbstl, B. Kögler, J. Lipp und M. Strohrmann, *Die digitale Transformation des Qualitätsmanagements: Potenziale nutzen, Strategien entwickeln, Qualität optimieren*. München: Hanser, 2022.
- [17] P. B. Jensen, L. N. Laursen und L. Møller Haase, „Barriers to product longevity: A review of business, product development and user perspectives,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 313, Art.-Nr. 127951, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127951.
- [18] R. Harms und J. D. Linton, „Willingness to Pay for Eco-Certified Refurbished Products: The Effects of Environmental Attitudes and Knowledge,“ *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 20, Nr. 4, S. 893–904, 2016, doi: 10.1111/jiec.12301.
- [19] B. Sarkar, M. Ullah und M. Sarkar, „Environmental and economic sustainability through innovative green products by remanufacturing,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 332, Art.-Nr. 129813, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129813.
- [20] T. Zonta, C. A. da Costa, R. da Rosa Righi, M. J. de Lima, E. Silveira da Trindade und G. P. Li, „Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review,“ *Computers & Industrial Engineering*, Jg. 150, Art.-Nr. 106889, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106889.
- [21] E. Chierici und G. Copani, „Remanufacturing with Upgrade PSS for New Sustainable Business Models,“ *Procedia CIRP*, Jg. 47, S. 531–536, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.03.055.
- [22] J. Bonvoisin, F. Halstenberg, T. Buchert und R. Stark, „A systematic literature review on modular product design,“ *Journal of Engineering Design*, Jg. 27, Nr. 7, S. 488–514, 2016, doi: 10.1080/09544828.2016.1166482.
- [23] M. A. Khan, S. Mittal, S. West und T. Wuest, „Review on upgradability – A product lifetime extension strategy in the context of product service systems,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 204, S. 1154–1168, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.329.
- [24] H. Cheng, S. Dong, F. Li, Y. Yang, Y. Li und Z. Li, „A circular economy system for breaking the development dilemma of ‘ecological Fragility–Economic poverty’ vicious circle: A CEEPS-SD analysis,“ *Journal of Cleaner Production*, Jg. 212, S. 381–392, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.014.
- [25] G. Grunwald, J. Schwill, *Nachhaltigkeitsmarketing: Grundlagen – Gestaltungsoptionen – Umsetzung*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 2022.
- [26] Europäische Kommission. „Sustainable consumption: Policy-relevant insights on the consumers' engagement in the circular economy.“ [commission.europa.eu. https://commission.europa.eu/live-work-travel-eu/consumer-rights-and-complaints/sustainable-consumption_de](https://commission.europa.eu/live-work-travel-eu/consumer-rights-and-complaints/sustainable-consumption_de) (Zugriff am: 5. Feb. 2023).
- [27] C. Collins und R. Kehoe, „Examining strategic fit and misfit in the management of knowledge workers,“ *ILR Review*, Jg. 70, Nr. 2, S. 308–335, 2017, doi: 10.1177/0019793916654481.
- [28] M. Schiffer, *Szenariorobuste Produktarchitekturgestaltung* (Ergebnisse aus der Produktionstechnik Produktionssystematik 2013,32). Aachen: Apprimus, 2013.
- [29] „Systems innovation,“ G. Mulgan und C. Leadbeater, London, 2013. Zugriff am: 5. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://media.nesta.org.uk/documents/systems_innovation_discussion_paper.pdf
- [30] Y. Liu, *Organisation von Subskription im Maschinen- und Anlagenbau* (Ergebnisse aus der Produktionstechnik 35/2021). Aachen: Apprimus, 2022.

- [31] M. Lennartsson und A. Björnfot, „Step-By-Step Modularity: a roadmap for building service development,“ *Lean Construction Journal*, Jg. 2010, S. 17–29, 2010.
- [32] „Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change: 2021 Reprint,“ A. Moriet *et al.*, 2019. Zugriff am: 5. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture>
- [33] J. Ma und G. E. O. Kremer, „A systematic literature review of modular product design (MPD) from the perspective of sustainability,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 86, Nr. 5-8, S. 1509–1539, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8290-9.
- [34] J. Yan und C. Feng, „Sustainable design-oriented product modularity combined with 6R concept: a case study of rotor laboratory bench,“ *Clean Technologies and Environmental Policy*, Jg. 16, Nr. 1, S. 95–109, 2013, doi: 10.1007/s10098-013-0597-3.
- [35] MTA Gerüstbau. „www.mta-geruestbau.de: Ihr kompetenter Partner für Gerüstbau.“ [mta-geruestbau.de. http://www.mta-geruestbau.de/](http://www.mta-geruestbau.de/) (Zugriff am: 17. Feb. 2023).
- [36] Framework Computer. „Framework Laptop 13: Jetzt erhältlich mit AMD Ryzen™ 7040 Series und 13th Gen Intel® Core™.“ [frame.work.de. https://frame.work/de/de](https://frame.work/de/de) (Zugriff am: 17. Feb. 2023).
- [37] F. A. S. Piran, D. P. Lacerda, L. F. R. Camargo, C. F. Viero, R. Teixeira und A. Dresch, „Product modularity and its effects on the production process: an analysis in a bus manufacturer,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 88, Nr. 5-8, S. 2331–2343, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8906-8.
- [38] H. Krikke, I. Le Blanc und S. van de Velde, „Product modularity and the design of closed-loop supply chains,“ *California management review*, Jg. 46, Nr. 2, S. 23–39, 2004, doi: 10.2307/41166208.
- [39] A.-C. Mellquist, R. Boyer und M. Williander, „Market Endurance: A cost-accounting based metric for measuring value retention for the Circular Economy,“ *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 179, Art.-Nr. 106117, 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.106117.
- [40] Fairphone. „Fairphone 4: Nachhaltig. Langlebig. Fair.“ [shop.fairphone.com. https://shop.fairphone.com/de/](https://shop.fairphone.com/) (Zugriff am: 17. Feb. 2023).
- [41] e.Volution. „Nachhaltige Plattform.“ [evolution-mobility.com. https://www.evolution-mobility.com/de/plattform/](https://www.evolution-mobility.com/de/plattform/) (Zugriff am: 17. Feb. 2023).
- [42] Europäisches Parlament. „Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile.“ [europarl.europa.eu. https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile](https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile) (Zugriff: 17. Feb. 2023).
- [43] Deloitte und Bundesverband der Deutschen Industrie. „Zirkuläre Wirtschaft. Herausforderungen und Chancen für den Industriestandort Deutschland.“ [deloitte.com. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/risk/Zirkul%C3%A4re%20Wirtschaft%20Studie_Deloitte%20und%20BDI.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/risk/Zirkul%C3%A4re%20Wirtschaft%20Studie_Deloitte%20und%20BDI.pdf) (Zugriff am: 17. Feb. 2023).
- [44] M. Henry, D. Schraven, N. Bocken, K. Frenken, M. Hekkert und J. Kirchherr, „The battle of the buzzwords: A comparative review of the circular economy and the sharing economy concepts,“ *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Jg. 38, S. 1–21, 2021, doi: 10.1016/j.eist.2020.10.008.

- [45] P. Morone und R. Navia, „New consumption and production models for a circular economy,” *Waste Management & Research*, Jg. 34, Nr. 6, S. 489–490, doi: 10.1177/0734242X16652281.
- [46] MIL Maschinen & Industrieanlagen-Leasing. „Unsere Erfahrung hat eine lange Laufzeit: MIL Maschinen & Industrieanlagen-Leasing AG.” mil-ag.com. <https://mil-ag.com/> (Zugriff am: 17. Feb. 2023).
- [47] P. Kölsch, J. C. Aurich und C. F. Herder, „Grundlagen zu Produkt-Service Systemen,” in *Entwicklung datenbasierter Produkt-Service Systeme: Ein Ansatz zur Realisierung verfügbarkeitsorientierter Geschäftsmodelle*, J. C. Aurich, W. Koch, P. Kölsch und C. Herder, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2019, S. 5-15.
- [48] Philips. „Philips.” lighting.philips.com. <https://www.lighting.philips.com/main/home> (Zugriff am: 17. Feb. 2023).
- [49] Verlag 320°. „Wie viel E-Schrott durch Reparaturen vermieden wird.” 320grad.de. <https://320grad.de/2021/05/19/wie-viel-e-schrott-durch-reparaturen-vermieden-wird/> (Zugriff am: 17. Feb. 2023).
- [50] J. H. Seelig, S. Birkenfeld, F. Hansen und O. Keich, „Innovative Geschäftsmodelle auf Basis der industriellen Demontage von Fahrzeugbaugruppen,” in *Entrepreneurship der Zukunft: Digitale Technologien und der Wandel von Geschäftsmodellen*, S. Gerth und L. Heim, Hg., Wiesbaden: Springer Gabler, 2022, S. 123–142.
- [51] Y. Gong, S. Xie, D. Arunachalam, J. Duan und J. Luo, „Blockchain - based recycling and its impact on recycling performance: A network theory perspective,” *Business Strategy and the Environment*, Jg. 31, Nr. 8, S. 3717–3741, 2022, doi: 10.1002/bse.3028.
- [52] J. Li, F. Tao, Y. Cheng und L. Zhao, „Big Data in product lifecycle management,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 81, Nr. 1-4, S. 667-684, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7151-x.
- [53] R. Sudarsan, S. J. Fenves, R. D. Sriram und F. Wang, „A product information modeling framework for product lifecycle management,” *Computer-Aided Design*, Jg. 37, Nr. 13, S. 1399–1411, 2005, doi: 10.1016/j.cad.2005.02.010.
- [54] Y. Zhang, S. Ren, Y. Liu, T. Sakao und D. Huisingsh, „A framework for Big Data driven product lifecycle management,” *Journal of Cleaner Production*, Jg. 159, Art.-Nr. 229240, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.172.
- [55] L. Wang, Z. Liu, A. Liu und F. Tao, „Artificial intelligence in product lifecycle management,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 114, Nr. 3, S. 771–796, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-06882-1.
- [56] V. Venkatasubramanian, „Prognostic and diagnostic monitoring of complex systems for product lifecycle management: Challenges and opportunities,” *Computers & Chemical Engineering*, Jg. 39, Nr. 6, S. 1253-1263, 2005, doi: 10.1016/j.compchemeng.2005.02.026.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 4.1:

Riccardo Calchera, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Gerret Lukas, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Lea Niwar, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

Dr.-Ing. Seth Schmitz, WZL | RWTH Aachen University, Aachen

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

Martin Welsing, WZL | RWTH Aachen University, Aachen