THINKTANK
INDUSTRIELLE
RESSOURCEN-
STRATEGIEN

BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG DER KREISLAUFWIRTSCHAFT – STRATEGISCHE ENTSCHEIDUNGSUNTERSTÜTZUNG FÜR KREISLAUFORIENTIERTE PRODUKTIONSSYSTEME

Vorwort

Kreislaufwirtschaft ist kein Kostenfaktor, sondern ein strategisches Investitionsfeld. Mit den richtigen Bewertungsinstrumenten lassen sich Chancen und Risiken klar abwägen – und Kreislaufführung wird zu einem Wettbewerbsvorteil, der Unternehmen langfristig erfolgreich positioniert. Damit Unternehmen diese Potenziale systematisch erschließen können, braucht es Bewertungsansätze, die ökologische Zielsetzungen mit betriebswirtschaftlicher Rationalität verbinden.

Ziel der Studie war es, einen ökonomischen Bewertungsansatz für Kreislaufführungskonzepte von Produkten und Bauteilen zu entwickeln. Der Ansatz berücksichtigt unterschiedliche, teilweise substituierbare Verwertungsoptionen zur Kreislaufschließung am Ende einer Wertschöpfungskette. Damit wird es möglich, nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Effekte verschiedener Strategien transparent zu machen und vergleichbar zu bewerten.

Um die Flexibilität und Anwendbarkeit des Ansatzes zu demonstrieren, werden zwei sehr unterschiedliche Produktgruppen untersucht: Waschmaschinen als langlebige Konsumgüter mit etablierten Märkten und Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen als technologisch dynamisches, strategisch relevantes Bauteil. Beide Beispiele werden in unterschiedlichen Marktsituationen und mit verschiedenen Absatzwegen (Geschäftsmodellen) analysiert und diskutiert.

Mit dieser Broschüre möchten wir Entscheidungsträgern in Unternehmen, Politik und Finanzwelt eine fundierte Grundlage bieten, um Kreislaufführungskonzepte nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch zu bewerten.

Dr. Christian Kühne
Geschäftsführer
THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

Kurzfassung

Ziel dieses Projekts war es, ein Tool zur Entscheidungsunterstützung bei Kreislaufschließkonzepten zu entwickeln. Wir bewegen uns momentan von einer Wirtschaft mit linearen Struktur und Wertschöpfungsketten hin zu einer zirkulären Wertschöpfungsstruktur, bei der Materialien und andere Ressourcen im Kreis geführt werden, um dadurch den Ressourcenverbrauch und den Einsatz von Primärmaterialien zu senken. Dabei gibt es zahlreiche Möglichkeiten und Optionen zur Gestaltung der Verwertungsprozesse obsoleter Produktströme mit dem Ziel ressourcenschonende Bauteil- und Materialkreisläufe zu schaffen. Es stehen Verwertungsoptionen wie (direct) Reuse, Repurposing, Remanufacturing und Recycling zur Verfügung. Beim (direct) Reuse werden Produkte ohne großen mechanischen oder chemischen Aufwand direkt wieder- und weiterverwendet, beim Repurposing werden alternative Second-Life Konzepte umgesetzt, beim Remanufacturing ist ein größerer mechanischer oder chemischer Aufwand nötig, um Produkte wieder einsatzfähig zu machen und beim Recycling hat das Produkt selber sein Lebensende erreicht, so dass die Rückgewinnung von möglichst reinen Materialien im Fokus steht, oder zumindest die energetische Verwertung.

Nachdem zunächst ein Überblick über die Begrifflichkeiten der Kreislaufwirtschaft gegeben wird, erfolgt im Anschluss die Entwicklung des Excel basierten Modells. Mit Hilfe von Kosten- und Erlösangaben wird ermittelt welche Verwertungsoptionen ein Unternehmen bei einem Produkt- und dessen Lebenszyklus wählen sollte, um die ökonomisch optimale Wahl zu treffen.

Innerhalb dieses Projekts wird das Tool für zwei Beispielrechnungen eingesetzt, um dessen Funktionsweise aufzuzeigen. Beim ersten Beispiel wird die Wiederverwendung von Waschmaschinen in einem zweiten Lebenszyklus berechnet. Hierzu wird eine hochwertige Waschmaschine mit einem Neupreis von 1000€ angenommen und für einen Preis von 400€ in einen zweiten Lebenszyklus verkauft. Im zweiten Berechnungsbeispiel werden die Verwertungsoption Reuse, Remanufacturing oder Recycling für eine Traktionsbatterie eines elektrischen Fahrzeugs berechnet.

Im Anschluss wird ein Ausblick für noch mögliche weitere Verbesserungen gegeben. Bisher wurde das Thema der zirkulären Wertschöpfungsstruktur von Produkten im Tool stets auf monetärer Basis betrachtet. Für eine ganzheitliche und vor allem nachhaltige Betrachtung fehlen noch die ökologische und soziale Sichtweise. Hierfür können Ansätze der Ökobilanzierung herangezogen werden, um die ökologischen Auswirkungen der Produkte und ihr Einsparpotential im Vergleich zu neuen Produkten zu analysieren. Zum anderen können die sozialen Auswirkungen und auch die Entstehung neuer Geschäftsmodelle in einer sozialen Bilanz berücksichtigt und bewertet werden.

Abstract

The aim of this project was to develop a tool for decision support considering the circular economy concept. Today, the world is developing from an economy with a linear structure and supply chains towards a circular economy, where materials and resources are moved in circles. This structure helps to reduce resource demand and the usage of primary materials. Many different recovery options can be applied to create a circular economy structure once a product reached his (first) end of life stage.

In this project, the recovery options (direct) reuse, remanufacturing and recycling are considered and included. (Direct) Reuse means that products are used without having to undergo a massive mechanical or chemical treatment and can be used straight away. A bigger mechanical or chemical treatment is necessary within the remanufacturing option, so that products are restored and can go into an additional use. At the recycling stage, the product reached its end of life and the only option is to recover materials or at least energy.

To begin with, an overview of the terms of circular economy is given, afterwards the Excel based tool is developed. Based on cost and return flows, the best possible recovery option for a product and its life cycle are calculated with the aim to get the most economic-friendly solution.

Within this project the tool and its calculation approach are explained by calculating two different examples. At first, the recovery options of second life washing machines are used. We assume a top-quality washing machine with an original price of 1000€, that is then sold for 400€ for the second life. For the second example, we used electric vehicle batteries. The interpretation of results is discussed, and barriers are outlined. As a second example we discuss the use of the tool for the assessment of alternative recovery options for used electric vehicle batteries.

We conclude with an outlook of further improvements of the decision support tool. So far, only the economic aspect from a monetary perspective has been considered. To fully analyze the sustainability of the introduced recovery options an ecological and social consideration is necessary. Therefore, we suggest the calculation of a life cycle assessment to determine the environmental impacts and benefits achieved through the 2nd life of products. Furthermore, a social life cycle assessment can be performed to evaluate the social impacts as well as the effects occurring through the development of new business models.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung 03
Abstract 04
Inhaltsverzeichnis 05
Abbildungsverzeichnis 07
Tabellenverzeichnis 08
Abkürzungsverzeichnis 08

1 Einleitung 9
1.1 Hintergrund und Motivation 9
1.2 Zielsetzung des Beitrags 9
1.3 Aufbau 10

2 Wege zur Kreislaufschließung 11
2.1 Chancen, Hindernisse und Voraussetzungen bei der Kreislaufschließung 13
2.2 Recycling 16
2.3 Remanufacturing 17
2.4 Reuse 19

3 Entwickelter Bewertungsansatz 22
3.1 Bestehende Bewertungsansätze 22
3.1.1 Life Cycle Costing und Total Cost of Ownership 22
3.1.2 Materialflusskostenrechnung 25
3.1.3 Wirtschaftlichkeitsberechnung 26
3.2 Entwicklungs- und Anpassungsbedarf existierender Ansätze 27

4 Modellentwicklung 28
4.1 Konzeptmodell 28
4.2 Formales Modell 30
4.2.1 Qualitative Beschreibung 30
4.2.2 Quantitative Beschreibung 32
4.3 Ausführbares Modell 39
4.3.1 Dateneingabe 40
4.3.2 Dokumentation der Ergebnisse 42
4.3.3 Voraussetzungen zur Anwendung 43

5 Modellanwendung und Bewertung 44
5.1 Anwendung für Konsumgüter 44
5.1.1 Auswahl des Use Cases Waschmaschine 44
5.1.2 Bewertung des Use Cases Waschmaschine 47
5.2 Anwendung in der automobile Wertschöpfungskette 49
5.2.1 Beschreibung des Use Cases Traktionsbatterie 51
5.2.2 Bewertung des Use Cases Traktionsbatterie 52

6 Diskussion und Ausblick 56
6.1 Weiterentwicklung und Limitationen 56
6.1.1 Limitationen des Modells 56
6.1.2 Limitationen eines generischen Ansatzes 57
6.1.3 Ausweitung der Bewertungsdimensionen 58

7 Anhang 61
7.1 Beschreibung der Eingabefelder 61
7.2 Grafische Oberflächen des Berechnungstools 65
7.3 SWOT-Analyse 69
7.4 Übersicht über installierte und geplante Energiespeicher durch Automobilhersteller 70

8 Literaturverzeichnis 71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1
Element des Circular Economy Konzepts (angelehnt an Glöser-Chahoud, 2017) 12

Abbildung 2
Prozessschritte von Remanufacturing (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Lange 2018; Steinhilper 1998; Bullinger et al. 2009) 17

Abbildung 3
Skizzierung des Remanufacturing Marktes für Fahrzeugbauteile 18

Abbildung 4
Reuse von Mehrwegflaschen 19

Abbildung 5
Beispielhafte Kategorien der LCC (angelehnt an Woodward 1997) 24

Abbildung 6
Vorgehensstruktur der Modellentwicklung (abgeleitet von Rabe et al. (2008)) 28

Abbildung 7
Lebensphasen im Konzeptmodell 29

Abbildung 8
Grafisches Layout des modellierten formalen Modells 31

Abbildung 9
Funktionsprinzip der Modellierung 40

Abbildung 10
Zeitlicher Verlauf der Batterien in Nutzung bei unterschiedlichen Rückführungsquoten 52

Abbildung 11
Bauteile in der Nutzung beim Szenario "schlechtere Qualität" 53

Abbildung 12
Die drei Säulen der Nachhaltigkeit (Ludwikowski 2010) 59

Abbildung 13
Eingabemaske der Kosten-/Erlös und Nachfragedaten basierend auf der Kalkulationsstruktur eines Unternehmens inkl. Nachfrage und Rückführungsstruktur 65

Abbildung 14
Eingabemasken der Kosten-/Erlöse und Nachfragedaten der modellbezogenen Kostenstruktur 67

Abbildung 15
Eingabedaten der Rückführungsstruktur für modellbezogene Kostenstruktur 68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1
Treiber und Hemmnisse bei der Entwicklung einer zirkulären Wertschöpfungsstruktur 14

Tabelle 2
Normierte Ergebnisse der Anwendung am Beispiel von Waschmaschinen 48

Tabelle 3
Normierte Ergebnisse der Anwendung am Beispiel von Traktionsbatterien 54

Abkürzungsverzeichnis

LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life-Cycle-Costing
MFCA	Material Flow Cost Analysis
MFKR	Materialflusskostenrechnung
TCO	Total-Cost-of-Ownership
VBA	Visual Basic for Applications

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

In unserem derzeitigen Wirtschaftssystem werden große Mengen an kostengünstigen und kurzlebigen Produkten hergestellt, deren lineares Nutzungskonzept große Mengen an Abfall hervorbringt, wobei obsolete Produktströme nicht immer sinnvoll verwertet werden. Dies führt zu einer Rohstoffentnahme, die im letzten Jahrhundert um den Faktor 8 angestiegen ist wobei angesichts verschiedener Wachstumsfaktoren wie eine steigende Weltbevölkerung nicht erwartet wird, dass dieser Trend nachlässt oder sich verlangsamt. Bis 2030 werden ca. 3 Milliarden Konsumenten aus den Entwicklungsländern in eine globale Mittelschicht mit entsprechendem Konsumverhalten aufsteigen (Nguyen, H., Stutchey, M., Zils, M 2014). Um Ressourcen einzusparen, muss von einem linearen Lebenszyklus in Richtung eines geschlossenen Systems gedacht werden, in dem Rohstoffe und andere Ströme im Kreis geführt werden (Bressanelli et al. 2017). In der linearen Führung wird die Rohstoffentnahme, die Herstellung von Produkten aus diesen Rohstoffen, der Verkauf an den Endkunden und die Nutzung der Produkte durch diese sowie am Ende der Nutzungskette die Entsorgung der Produkte betrachtet. Hier wird also ein „cradle-to-grave" (von der Wiege bis zur Bahre) – Konzept angewendet bei dem Ressourcen im Endeffekt in Abfall verwandelt werden (Bressanelli et al. 2017; Sundin und Bras 2005). Um dem Bedarf an Rohstoffen in Zukunft gerecht werden zu können, muss es zu einer Entkopplung vom ökonomischen Wachstum und Ressourcenverbrauch kommen. Dies kann durch die Verwendung eines Kreislaufsystems erreicht werden. Innerhalb der Kreislaufwirtschaft werden Ressourcen, Materialien und Produkte mehrfach verwendet und dadurch wird eine Reduzierung von Ressourcen und Materialien als Input erreicht (Bressanelli et al. 2017; Ellen MacArthur Foundation 2012; Sundin und Bras 2005). Darüber hinaus kann auch eine Entwicklung von kurzlebigen Produkten hin zu längeren Lebenszyklen stattfinden, bei denen der funktionelle Nutzen (z.B. durch mieten, leasen etc.) im Vordergrund steht und nicht der materielle Verkauf. Hier kann der Lebenszyklus eines Produkts durch Verwertungsoptionen wie Remanufacturing und Reuse verlängert werden (Sundin und Bras 2005). Um dies zu erreichen, ist ein Umdenken vom traditionellen Produktverkauf zu einer mehr service-orientierten Produktnutzung nötig (Kimura 1997). Neben der Einsparung von Ressourcen, kann sich ein solches Modell auch für die Hersteller lohnen. Produkte bleiben so in ihrem Besitz und Erträge können durch Leasing- bzw. Mieteinnahmen sowie durch den Verkauf der Materialien nach dem Recycling erzielt werden (Sundin und Bras 2005). Die Frage, ob und ab welcher Stückzahl es sich für die Hersteller lohnt sich an einer kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfung zu beteiligen, lässt sich nicht einfach beantworten, da die Verwertung obsoleter Produktströme derzeit nahezu ausschließlich ohne Beteiligung der Hersteller der jeweiligen Güter stattfindet (markt- und produktabhängig). Die Verwertung wird von Demontage- und Recyclingunternehmen, Dienstleistern bzw. Abfallverwertern durchgeführt. Zwar sind Hersteller durch rechtliche Regelungen (z.B.:

(ElektroG, Altautoverordnung etc.)) sowie die erweiterte Produktverantwortung dazu verpflichtet, die Rücknahme und Verwertung ihrer Produkte zu gewährleisten, diese erfolgt aber meist über dafür geschaffene Netzwerke von Entsorgern bzw. Verwertern und im Allgemeinen nach wie vor ohne Herstellerbeteiligung. Für Hersteller existieren derzeit wenig Anreize zu einem recycling- oder demontagegerechten Produktdesign, da für deren Realisierung Kosten entstünden, denen keine (zukünftig) zu erwartenden Erlöse entgegenstehen. Seitens der Verwerter bestehen teilweise Informationsdefizite über die genaue Materialzusammensetzung oder die Möglichkeiten einer zielgerichteten Demontage, wodurch erhebliche Ineffizienzen zu vermuten sind. Weiterhin entstehen durch den Handel mit Altprodukten große Sammelverluste, da viele obsolete Hightech-Produkte (z.B. Altautos oder Elektrogeräte) außerhalb Deutschlands bzw. der EU das Ende ihrer Nutzungsphase erreichen. So bestehen zwar Ansätze der gezielten Kreislaufführung, die genannten Probleme stehen aber einer effektiveren und effizienteren Ausgestaltung der Kreislaufwirtschaft häufig entgegen (Maier et al. 2019).

Das Vorgehen bei der Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungstools, wie es hier im Projekt entwickelt und in diesem Bericht vorgestellt wird, wird anhand von Traktionsbatterien von elektrischen Fahrzeugen und anhand von Waschmaschinen erläutert.

1.2 Zielsetzung des Beitrags

Ziel dieses Berichts ist es einen ökonomischen Bewertungsansatz für Kreislaufführungskonzepte von Produkten oder Bauteilen zu entwickeln. Dieser Ansatz beinhaltet unterschiedliche, teilweise substituierbare Verwertungsoptionen zur Kreislaufschließung am Ende einer Wertschöpfungskette. Um die Flexibilität des Bewertungsansatzes zu zeigen, wird die Kreislaufführung für zwei unterschiedliche Produkte (Waschmaschinen und Traktionsbatterien aus E-Fahrzeugen) mit verschiedenen Absatzwegen (Geschäftsmodellen) und unterschiedlichen Marktsituationen bewertet und diskutiert.

1.3 Aufbau

Dieser Bericht Bericht ist in sechs Kapitel aufgeteilt. Nach der Einleitung erfolgt im zweiten Kapitel eine Vorstellung und Diskussion über ausgewählte Kreislaufschließungspfade, um die fachlichen Grundlagen zur späteren Vorstellung der entwickelten Fallstudien zu liefern. Kapitel 3 widmet sich der Vorstellung des entwickelten Bewertungsansatzes und -modells. In Kapitel 4 wird näher auf die Entwicklung des Modells eingegangen bevor in Kapitel 5 die Bewertung der beiden Produkte durchgeführt und ausgewertet. Abschließend findet in Kapitel 6 eine vergleichende Analyse und Diskussion statt, auf deren Basis weiterer Forschungsbedarf aufzeigt wird.

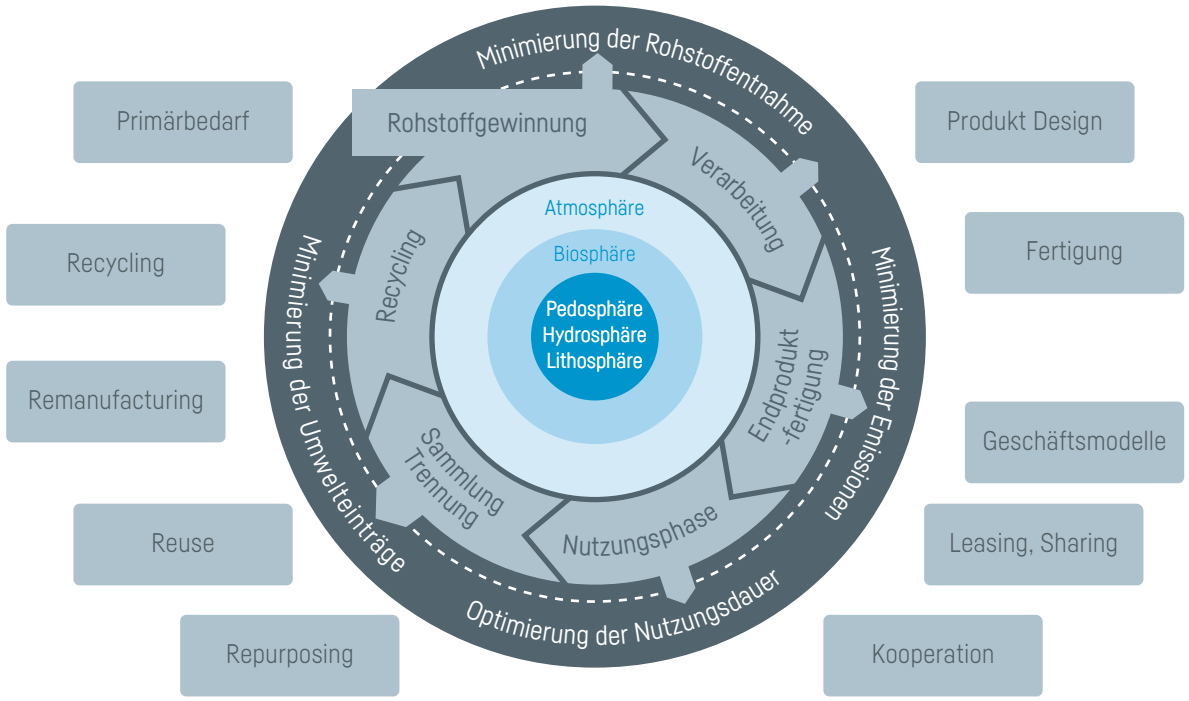
2 Wege zur Kreislaufschließung

Kreislaufwirtschaft und Circular Economy sind zwar unterschiedliche Konzepte, wobei unter anderem der Kreislaufwirtschaft eine Vorreiterrolle bei der Entwicklung des Circular Economy Konzepts zugeschrieben wird (Yuan et al. 2006; Hiebel et al. 2017). Im Folgenden werden beide Begriffe definiert und voneinander abgegrenzt.

Gemäß dem Kreislaufwirtschaftsgesetz wird unter „Abfall" jeder Stoff oder Gegenstand, „deren sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss", und „einer Verwertung oder Beseitigung zuführt oder die tatsächliche Sachherrschaft über sie unter Wegfall jeder weiteren Zweckbestimmung aufgibt" definiert (KrWG; Dehoust et al. 2010). Nicht immer bedeutet das auch, dass weggeworfene Gegenstände zu diesem Zeitpunkt wertlos sind. Laut dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg wird unter dem Ausdruck Abfall die enorme Mengen an Rohstoffen und Energieträgern verstanden, die aus der Umwelt entnommen werden, nach der Aufbereitung zu Konsumgütern produziert, die dann nach deren Gebrauch als Abfall auf dem Müll landen (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2014a). Indem Produkte wiederverwendbar sind, weggeschmissene Materialien wiederverwendbar bzw. wiederverwertbar sind und Abfälle entweder vermieden werden bzw. aufgearbeitet oder recycelt werden, können Ressourcen aus dem für den ehemaligen Besitzer „wertlosen" Stoff oder Gegenstand zurückgewonnen werden. Um eine hohe Ressourceneffizienz zu erreichen, ist die Wiedergewinnung von (Sekundär-) Rohstoffen, die Kreislaufführung dieser Rohstoffe, die Vermeidung von Abfällen in der Produktion sowie die umweltgerechte Erfassung und Verwertung von Abfällen essentiell (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2014b).

Im Vergleich dazu dehnt Circular Economy das (deutsche) Konzept der Kreislaufwirtschaft auf die Herstellung und Gestaltung kreislauffähiger Produkte aus (Hiebel et al. 2017). Scheelhaase und Zinke (2016) definieren in ihrer Studie für das Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk NRW Circular Economy (auf Deutsch Zirkuläre Wertschöpfung) als „das Konzept einer nachhaltigen, innovationsgetriebenen Wirtschaftsweise, die biologische und technische Kreisläufe differenziert und sukzessive zur Entkopplung des Wirtschaftswachstums von einer Rohstoffentnahme führt. Die Basis bildet ein nutzwerterhaltender Innovationsansatz, durch den die Residualwerte von Produkten und Materialien durch neue Produkte, Verfahren, Geschäfts- und Betreibermodelle maximiert wieder- und weiterverwendet werden können." (Scheelhaase und Zinke 2016). Das Fraunhofer UMSICHT dagegen argumentiert, dass „in einer Circular Economy die eingesetzten Stoffe über den Lebenszyklus von Waren hinaus in einem Stoffkreislauf verbleiben. Abfälle, Emissionen, dissipative Verluste und damit auch die Entnahme von Rohstoffen aus der Umwelt sollen dabei soweit möglich verringert werden. Wichtige Elemente zur Umsetzung einer Circular

Economy sind die Wieder- und Weiterverwendung von Waren, das Recycling von Materialien und Stoffen sowie eine Gestaltung der Waren, die eine Kreislaufführung ohne Verluste in der Qualität ermöglicht. Gleichzeitig muss eine Anreicherung von Stoffen, die eine Kreislaufführung erschweren und die Akkumulation von Schadstoffen vermieden werden. Dabei soll die Nutzungsdauer von Waren möglichst lang und ihre Rückführung in den Kreislauf zum Ende der Nutzungsdauer möglichst schnell sein. [...]" (Hiebel et al. 2017). Für den weiteren Verlauf dieser Studie schließen wir uns der Definition von Hiebel et al. an, wobei die Begriffe Circular Economy und zirkuläre Wertschöpfungsstruktur gleichrangig verwendet werden.



Element des Circular Economy Konzepts (angelehnt an Glöser-Chahoud, 2017)

Abbildung 1 Element des Circular Economy Konzepts (angelehnt an Glöser-Chahoud, 2017)

2.1 Chancen, Hindernisse und Voraussetzungen bei der Kreislaufschließung

Der Circular Economy bzw. der zirkulären Wertschöpfung geht seitens der Unternehmensstruktur ein Innovationscharakter voraus. Zum einen werden sich neue Geschäfts- und Kooperationsmodelle ausbilden, weil Produkte zu Dienstleistungen werden und umgekehrt. Zum anderen wird es durch eine verstärkte Nutzung des Circular Economy Konzepts zu Produkt- und Prozesssinnovationen kommen, bei dem neuartige Produkte, Dienstleistungen und Materialstrukturen hervorgebracht werden können. Die Entwicklungen im Bereich des Circular Economy Konzepts führen auch zu einer Sensibilisierung und erhöhten Nachfrage seitens der Konsumenten nach schadstoffarmen Materialien, qualitativ hochwertigen und flexiblen Produkten und Servicelösungen. Gleichzeitig wir eine umfassenden Produktverantwortung, möglichst langen Nutzungsdauer, hohen Haltbarkeit und Reparierbarkeit und einer einfache Rückgabemöglichkeit immer wichtiger für Konsumenten (Scheelhaase und Zinke 2016).

Die bisher gültigen und erprobten Strukturen in der Industrie und im Handel sind stark von fossilen Energieträgern und der linearen Verwendung von Materialien und Produkten abhängig. Die Entwicklung von dieser linearen Struktur hin zu einer zirkulären Wertschöpfungsstruktur umfasst unter anderem die Neugestaltung der Wertschöpfungsketten bezüglich des Materia flusses, als auch des Informationsflusses. Nur durch eine lückenlose Kommunikation und eine engere Bindung der einzelnen Akteure entlang der Wertschöpfungskette kann eine fundierte Grundlage für die Wiedernutzung und Wiederverwertung von Materialien und Produkten geschaffen werden. Weitere Faktoren, die für ein Unternehmen für oder gegen die Einführung eines Circular Economy Konzepts sprechen, sind der Rohstoffpreis und die Kosten der Rohstoffbeschaffung. Ist der Rohstoffpreis zu niedrig, wirkt das einer Investition in die Umstellung der Produktion in Richtung einer zirkulären Wertschöpfungsstruktur entgegen. Bei einem teureren Rohstoffpreis dagegen, kann sich die Umstellung (früher) lohnen. Auch politisch gesehen, wurden bisher kaum Anreize geschaffen um von einer linearen Struktur auf ein Circular Economy Konzept umzusteigen (Scheelhaase und Zinke 2016).

Weitere Treiber und Hemmnisse können Tabelle 1 entnommen werden (direkt aus (Fennemann et al. 2017)).

Tabelle 1 Treiber und Hemmnisse bei der Entwicklung einer zirkulären Wertschöpfungsstruktur

Treiber		Hemmnisse	
Ressourcenverknappung	Volatile Preise von Primärressourcen Importzölle und Marktabschottung	Geschäftsmodelle	Geschäftsmodelle sind auf Absatz (kurzlebiger) Güter ausgerichtet Übergang zu neuen (z.B. service-orientierten) Geschäftsmodellen erfordert radikales Umdenken
Rechtliche Vorschriften	Ansätze für Rechtsvorschriften zur Circular Economy flankieren Abfall-/Umweltrecht Einschränkung der Möglichkeiten zur Verbrennung von Abfällen, Deponierungsverbote	Technologien	Aufbereitungstechnologien für Altprodukte sind noch nicht ausgereift Datenaustausch über zirkuläre Supply Chains hinweg ist noch nicht gewährleistet (Datensicherheit/-souveränität)
Technologien	Moderne Produktionsverfahren, Digitalisierung, Industrie 4.0, Internet der Dinge, disruptive technologische Innovationen	Kooperation	Lock-in-Effekte (bestehende Anbieter-Kundenbeziehungen) und Komplexität bestehender Wertschöpfungsnetzwerke Hoher Koordinationsaufwand zur Integration der Akteure über alle Wertschöpfungsstufen hinweg
Ziele für nachhaltige Entwicklung	Einhaltung der »Sustainable Development Goals« der Vereinten Nationen als gesamtgesellschaftliche Aufgabe und Verantwortung der einzelnen Unternehmen	Produkte	Produkte/Materialien sind nicht circular-economy-gerecht gestaltet (insbesondere Massenprodukte mit kurzen Innovationszyklen, z.B. Smartphones) Komplexität der Produkte und Materialien

Treiber		Hemmnisse	
		Rechtliche Vorschriften	Bisher kein vollumfängliches Rechtsgefüge für die Circular Economy, d.h. Fokus auf Abfall- und Umweltrecht ohne Verknüpfung zu Produkt- und Wirtschaftsvorschriften
		Konsumentenverhalten	Produkte als Statussymbol “Geiz-ist-geil-Mentalität”
		Kosten	Logistik und Aufbereitungskosten hoch (in Konkurrenz zur energetischen Verwertung) Investitionen für Systemumstellung schrecken ab
		Markt	Bisher zu geringe Nachfrage nach Sekundärrohstoffen Primärrohstoffe preisgünstiger als Sekundärmaterialien Nachhaltigkeit häufig nachrangiges Beschaffungskriterium

2.2 Recycling

Laut dem deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz ist „Recycling“ definiert als „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber nicht die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.“ (KrWG). Recycling zielt damit auf die nachhaltige, umweltgerechte, und ressourceneffiziente Rückführung von abfallabgeleiteter Sekundärrohstoffe zurück in den Wirtschaftskreislauf ab (Martens und Goldmann 2016).

Recycling führt zwar zum Ende eines Produktlebens, allerdings können einzelne Komponenten bzw. Materialien auch nach Erreichen der Nutzungsphase wieder- oder weiterverwendet werden. Die Stufen der Recyclingkette umfassen dabei die Sammlung und Vorsortierung der Abfälle, die je nach Art lokal, regional oder zentral gesammelt werden und im besten Fall sortenrein anfallen oder in stark bzw. eingeschränkt vermischten Sammelgruppen vorliegen. Danach folgt die Vorbehandlung und gegebenenfalls eine Demontage. Eine Vorbehandlung ist immer dann nötig, wenn Komponenten und Materialien durch Inhaltstoffe und Verunreinigungen den weiteren Verwertungsprozess stören, Sekundärrohstoffe kontaminiert werden oder problematische Emissionen auftreten. Bei größeren und komplexen Produkten ist eine Demontage notwendig. Man unterscheidet Recycling in Komponenten- bzw. Produktrecycling und Material- bzw. Werkstoffrecycling, darüber hinaus kann auch die stoffliche Nutzung von Abfallströmen als Material im Bau zum Recycling gezählt werden. Das Komponenten- und Produktrecycling umfasst laut Definition von Martens und Goldmann (2016) die in diesem Bericht verwendeten Begriffe „Remanufacturing“ (Kapitel 2.3) und „Reuse“ (Kapitel 2.4) (Martens und Goldmann 2016), deswegen wird für den weiteren Bericht nur das Material- bzw. Werkstoffrecycling als Recycling bezeichnet. Materialrecycling wird durch die Prozesse der mechanischen Aufbereitung und der metallurgischen und chemischen Verfahrenstechnik ermöglicht. Bei einer mechanischen Aufbereitung folgen nun die Zerkleinerung, die Klassierung, die Sortierung, die Kompaktierung und die Feststoff-Fluid-Trennung. Die thermischen (z.B.: Destillations- und Verdampfungsverfahren) und chemischen (z.B.: Chemische Auflösung fester Abfälle) Verfahrenstechniken werden vor allem als Verarbeitungsstufe nach einer mechanischen Aufarbeitung eingesetzt. Allerdings lassen sich die verwendeten Werkstoffe und Materialien unterschiedlich gut und in unterschiedlicher Qualität recyceln, was bei der Wieder- und Weiterverwendung der Materialien zu Problemen führen kann (Martens und Goldmann 2016).

2.3 Remanufacturing

Remanufacturing (Aufarbeitung oder auch Refabrikation) ist stets ein standardisierter, zumeist dokumentierte Verwertungsprozess (Parker und Butler 2007; Steinhilper 1998; APRA et al. 2016; Ke et al. 2011). Nach (Ijomah 2009) hat Produkt nach dem Remanufacturing wieder die gleiche oder eine bessere Qualität als ein Neuteil.

Beim Remanufacturing von mechanischen Produkten (Abbildung 2) sollten, gemäß Steinhilper (1998), die folgenden Phasen durchlaufen werden: Vollständige Demontage, Reinigung aller Komponenten, Inspektion, Testen und Sortieren aller Komponenten, Überarbeitung aller Komponenten und Ergänzung durch Neuteile sowie das finale Testen. Für mechatronische Produkte kommt die Eingangsprüfung des Produkts hinzu. Dieser Schritt dient vor allem der Identifizierung von elektronischen Problemen, die nicht auf die mechanische Abnutzung zurückführbar sind (Bullinger et al. 2009; Steinhilper 1998; Lange 2018).

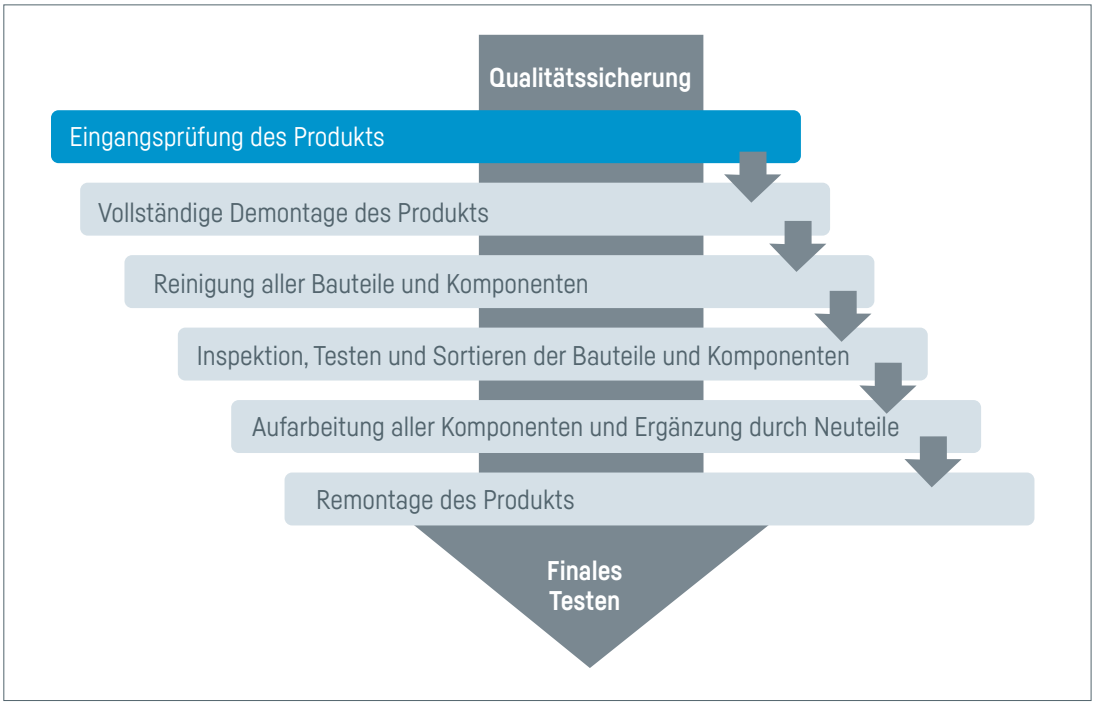


Abbildung 2 Prozessschritte von Remanufacturing (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Lange 2018; Steinhilper 1998; Bullinger et al. 2009)

In der weiteren Literatur werden auch vorgelagerte Prozesse, wie die Rückläufersammlung, Dokumentation, sowie Liefer- und Wertschöpfungskette als zusätzliche Prozessschritte betrachtet (Lange 2018). Diese sind besonders dann von Interesse, wenn sie bei einem angestrebten Remanufacturing anders zu gestalten sind als beispielsweise bei einem Recycling, also z. B. besondere Verpackungen zum produktschonenden Transport notwendig sind.

Die Prozesse des Remanufacturing sind in einen Markt eingebunden, der einerseits die aufzuarbeitenden Produkte (cores) bereitstellt und andererseits auch als Absatzmarkt dient. Dabei unterscheidet sich das Marktumfeld auch danach, welche Produkte in welcher Bearbeitungszeit aufgearbeitet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Markt zur Aufarbeitung von Investitionsgütern aus dem Maschinenbau weniger Marktteilnehmer und ein geringeres Stückvolumen hat, als der Aufarbeitungsmarkt für Autoersatzteile, wie er in Abbildung 2 skizziert ist. Auch gibt es Unterschiede darin, ob ein Kunde bzw. Abnehmer das zuvor zum Remanufacturing gegebene Produkt zurückerhält oder ein anderes, gleichwertiges Aufbereitetes. Die genaue produktions- und fertigungstechnische Ausgestaltung eines Aufarbeitungsprozesseses ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig. So bestimmt etwa die Anzahl der aufzuarbeitenden Produkte und die dafür benötigte technische Ausstattung die fertigungstechnische Ausgestaltung (Westkämper und Warnecke 2010).

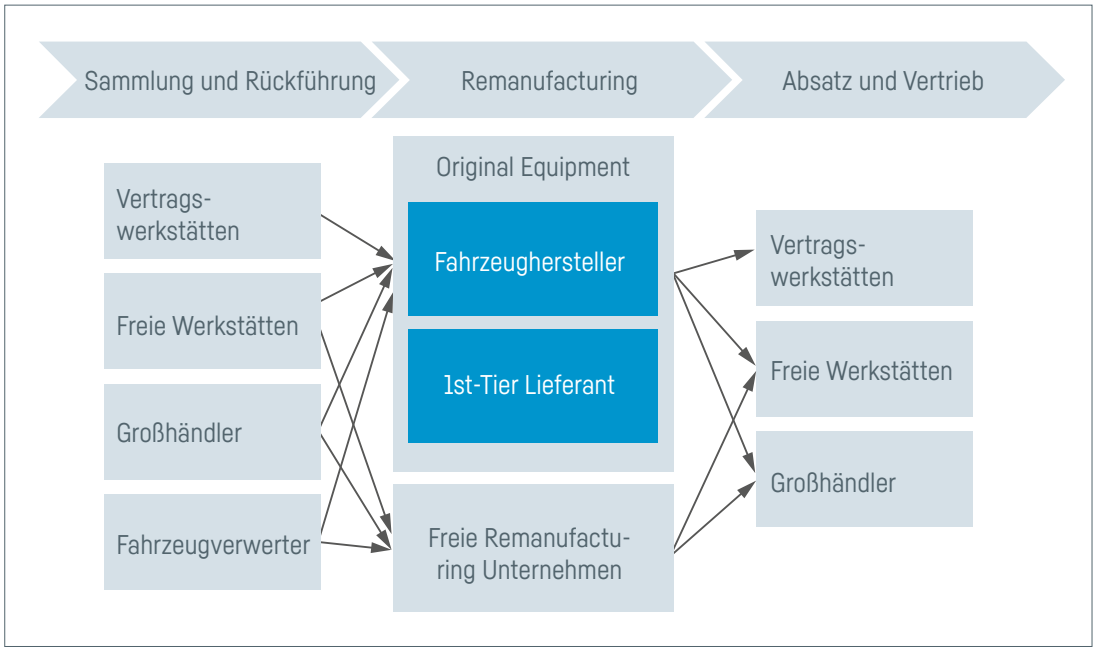


Abbildung 3 Skizzierung des Remanufacturing Marktes für Fahrzeugbauteile

Während die Aufarbeitung von Industriemotoren oder technischen Anlagen eher der Fertigung eines Einzelproduktes entspricht wird in anderen Bereichen eine Aufarbeitung im Sinne der Fließfertigung angestrebt, es wird also eine Mehrzahl an identischen Produkten aufgearbeitet (Westkämper und Warnecke 2010).

2.4 Reuse

Die Kreislaufschließung durch Reuse steht für eine Wiederverwendung eines Produktes, d.h. an die letzte Nutzungsphase des Produktes erfolgt, nach einer Sammlung bzw. Redistribution eine weitere Nutzungsphase, ohne andere wertschöpfende Prozesse durchzuführen. Das Produkt ist zum Zeitpunkt des Reuse noch funktionsfähig, wenn auch bereits eine Abnutzung oder Verschlechterung der Produktqualität während der ersten Nutzung stattgefunden haben kann.

Im deutschen Bundesrecht wird die Kreislaufschließung durch Wiederverwendung im Kreislaufwirtschaftsgesetz und im Elektro- und Elektrogerätegesetz definiert. Eine Wiederverwendung liegt demnach vor, wenn das Produkt oder einzelne Bauteile eines Produktes nach der Verwertung für die gleiche Nutzung eingesetzt wird, wie zuvor (in der Erstnutzung) (ElektroG; KrWG).[1]

Ein bekanntes Produkt, dessen Reuse üblich ist, sind Mehrwegflaschen. In Abbildung 4 ist die Kreislaufführung von Mehrwegflaschen in Deutschland exemplarisch abgebildet. Mehrwegflaschen können diesen Nutzungsphasenkreislauf zwischen 20- und 50-mal durchlaufen, bevor die Abnutzung eine Weiterverwendung nicht mehr ermöglicht. Die Sammlung und Rückführung wird dabei durch ein Pfandsystem unterstützt, dass für die Verbraucher Anreize zur Rückgabe der Flaschen (und Getränkekisten) im Einzelhandel setzt. Die Rücknahme und Logistikstrukturen sind oftmals regional ausgelegt und durch den Getränkegroßhandel koordiniert (Deutsche Umwelthilfe 2014). Die Erhebung des Pfandes auf Mehrwegflaschen erfolgt ohne gesetzliche Rahmenbestimmungen und auf Basis des Eigeninteresses der Abfüller.

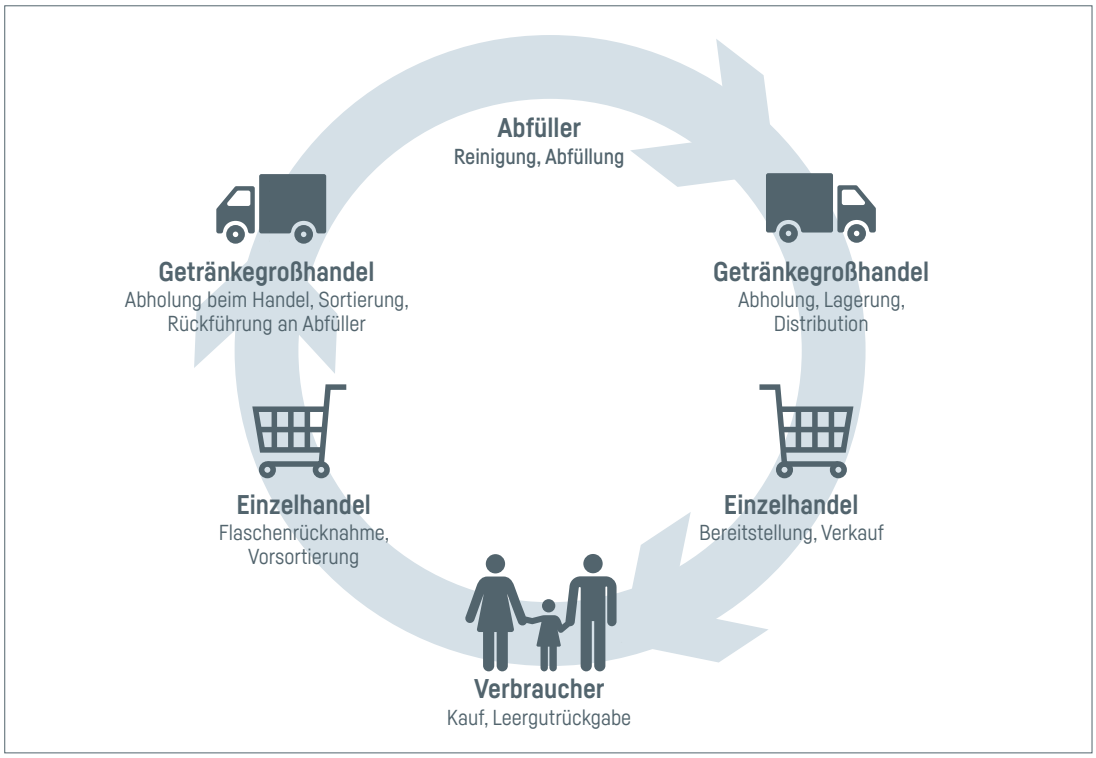


Abbildung 4 Reuse von Mehrwegflaschen

[1] Unterschiede gibt es aber auch zwischen dem KrWG und dem ElektroG darin, ob die Gegenstände zur Wiederverwendung die Eigenschaft haben Abfall zu sein oder nicht.

Geschäftsmodelle, bei denen der Reuse von Produkten im Vordergrund der Wertschöpfung steht, sind etwa der Verkauf von Second-Hand Kleidung oder das An- und Verkaufsgeschäfte für Elektrogeräte (Broehl-Kerner et al. 2012). Neben dem klassischen stationären Geschäft gibt es zunehmend auch Unternehmen, die ausschließlich den Absatz der wiederzuverwendenden Produkte über Webseiten anbieten. Die wertschöpfende Tätigkeit der Second-Hand Geschäftsmodelle besteht dabei im Wiederverkauf (Resell) der Produkte, wobei es Unterschiede darin gibt, ob das Unternehmen die Produkte zunächst selbst ankauft oder der Verkauf nur auf Basis von Kommission erfolgt.

Von einer Wieder- oder Weiterverwendung ist hingegen eindeutig das Konzept der Wiederverwertung zu unterscheiden. Dieses fokussiert eine stoffliche Nutzung der im Produkt enthaltenen Ressourcen und zählt somit zur Kategorie Recycling. Weitere Verwertungswege in der Kreislaufwirtschaft.

Das Remanufacturing oder der Reuse ermöglicht es Produkte oder zumindest Bauteile in eine weitere Nutzungsphase zu bringen. Die Nutzungszeit der Produkte wird dementsprechend verlängert, wobei die zweite Nutzungszeit nicht der der Ersten entsprechen muss. Ob das aufbereite oder wiederverwendete Produkt dabei zuvor als Abfall zu bezeichnen war, kann unterschiedlich sein.

Gerade beim Reuse von technischen Produkten, ist davon auszugehen, dass während der vorherigen Nutzung bereits ein Verschleiß von Bauteilen stattgefunden hat und somit eine geringere zweite Nutzungszeit, bedingt durch das Ende der Funktionalität des Produktes folgt.

Die Durchführung einer Aufarbeitung kann dazu genutzt werden, Teile mit einem hohen zu erwartenden Verschleiß auszutauschen. Neben der vorgestellten Begrifflichkeit des Remanufacturings gibt es weitere Konzepte, die dazu führen ein Produkt oder zumindest enthaltenen Bauteile am Ende der Erstnutzung, in eine weitere Nutzung zu überführen.

Die Konzepte des Reconditioning, des Refurbishment oder auch des Repurposing sind miteinander und zu den Konzepten Reuse und Remanufacturing eng verwandt und nicht einheitlich und eindeutig definiert.

Repurposing zielt auf eine Umwidmung von Produkten (oder Bauteilen) für eine andere Verwendung als bei der Erstnutzung ab. Im Vergleich zum Reuse ist jedoch ein Umwidmungsprozess notwendig, der diese andere Anwendung erst ermöglicht. Die physischen Eigenschaften können sich elementar durch das Repurposing ändern. Ein Beispiel ist Erstellung von Möbelstücken aus alten Skiern oder Skateboards. Denkbar ist auch eine Überschneidung mit dem Begriff Upcycling, wobei beim Upcycling eine Wiederverwertung von Produkten stattfindet, die zuvor als „Abfall" von den Eigentümern bezeichnet wurden. Dies ist beim Repurposing nicht der Fall, vielmehr liegt der Fokus darauf, dass die Nutzung eine Andere ist, als ursprünglich.

Die Begrifflichkeit des Repurpsosing im geschäftlichen Umfeld ist bisher besonders bei der Wiederverwendung gebrauchter Batterien aus Elektrofahrzeugen üblich (Jiao und Evans 2018) um eine Second Life Anwendung zu ermöglichen.

Reconditioning und Refurbishment sind Verwertungswege, die auf die gleiche, ursprüngliche Nutzung des Produktes oder seine einzelnen Bestandteile abzielt (APRA 2012). Beim Reconditioning ist die Qualität des Produktes nach der Verwertung geringer oder gleich zum Urzustand, weswegen dieser Verwertungsweg der Verwertung durch Remanufacturing unterzuordnen ist (APRA 2012). Der Fokus beim Reconditioning liegt dabei auf der Überholung der Hauptkomponenten des Produktes und ist insgesamt weniger ressourcen-intensiv als das Remanufacturing (King et al. 2006).

Ein Refurbishment verfolgt der Definition der APRA (2012) nach das Ziel, das Erscheinungsbild des Produktes äußerlich dem eines Neuen anzugleichen (Aufpolieren). Es findet jedoch kein Austausch von Komponenten statt, so dass die Qualität der Produkte oftmals unter der von aufgearbeiteten Produkten liegt (APRA 2012). Die Klassifizierung von (Potting et al. 2017) ist eine andere. Sie verstehen unter einem Refurbishment den Ersatz alter Bauteile mit neuen Bauteilen und sortieren das Refurbishment an höherer Stelle in einer Kreislaufwirtschaft ein, als das Remanufacturing. Gharfalkar et al. (2016) untersuchte verschiedene Definitionen der unterschiedlichen Verwertungskonzepte und kommt zu dem Schluss, dass aufgrund fehlender die Begriffe Refurbishment und Reconditioning sehr heterogen verwendet werden.

3 Entwickelter Bewertungsansatz

3.1 Bestehende Bewertungsansätze

Sowohl in der Literatur als auch der Praxis gibt es eine Vielzahl an Ansätzen und Methoden zur ökonomischen Bewertung von Produkten, Prozessen oder Geschäftstätigkeiten. Ziel dieses Abschnittes ist es nicht, eine vollständige Aufstellung aller Ansätze zu erstellen, aber einige ausgewählte zu skizzieren und darzulegen, warum diese nicht in vollem Maße die für das vorliegende Projekt gestellten Anforderungen an eine Bewertung erfüllen.

3.1.1 Life Cycle Costing und Total Cost of Ownership

Die Lebenszykluskostenanalyse oder Life-Cycle-Costing (LCC) sowie das Prinzip des Total-Cost-of-Ownership (TCO) sind Bewertungsansätze des strategischen Kostenmanagements (Geissdörfer et al. 2009). Sie werden herangezogen, um die Gesamtkosten von Produkten und Investitionen ab der Produktentwicklung bis zum Ende der Produktnutzung zu erheben und haben ihren Ursprung im Bereich des Bau- und Militärs zur Bewertung großer, kapitalintensiver Produkte (Geissdörfer et al. 2009).

Produktentsorgungskosten werden formal oft einbezogen, in der praktischen Anwendung jedoch oft nicht bewertet (Geissdörfer et al. 2009).

In einer Lebenszykluskostenanalyse werden alle negativen Zahlungsströme über den Produktlebenszyklus einbezogen, die üblicherweise als Kosten bezeichnet werden, obwohl es sich aus Sicht der Rechnungslegung um Auszahlungen handelt. Positive Zahlungsströme entlang des Lebenszyklus, in der Regel wird von Erlösen gesprochen, werden nicht erfasst. Ziel ist es die Gesamtkosten eines Produktes über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu erfassen. Die Kostenermittlung kann entweder aus Sicht des Kunden oder aus Sicht des Produzenten erfolgen (Schild 2005). Üblich ist eine Einteilung der Kosten nach verschiedenen Lebenszyklusphasen, wie beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt (Woodward 1997), wobei es für die Einteilung der Phasen keine einheitlichen Vorgaben gibt.

Nach (Kaufman 1969) kann die Lebenszykluskostenanalyse in verschiedene Prozessschritte unterteilt werden. Eine besonders wichtige Aufgabe kommt dabei der Identifizierung aller Kostenelemente entlang des Lebenszyklus zu. Die Unterteilung von (Kaufman 1969), die er für den Erwerb von Investitionsgütern entwickelte, sieht unter anderem die folgenden Bestandteile vor:

- Anschaffung *(Acquisition)*: Zu den Anschaffungskosten zählen neben dem Kaufpreis inkl. Lieferung auch die Installation bzw. Errichtung des Produktes. Darüber hinaus aber auch zukünftige Kosten für den Rückbau und die Entsorgung.
- Betriebskosten *(Operation)*: Zu den Betriebskosten gehören u.a. alle direkten und indirekten Arbeitskosten, Steuern, Versicherungen, Kosten für Raumnutzung in der Fabrik, Kosten für Energie zum Betrieb
- Wartungskosten *(Maintenance)*: Personalkosten für die Wartung und Instandsetzung, Kosten für die Bereitstellung von Ersatzteilen, Reinigungskosten sowie Kosten für Schmierstoffe

Die Kosten werden zunächst in einer einheitlichen monetären Größe für das Jahr der Analyse ermittelt. Im Anschluss erfolgt eine Anpassung und Fortschreibung einzelner Kostenkomponenten über die Lebenszeit des Produktes. Für Personalkosten kann dies eine jährlich zu erwartende Lohnanpassung sein, die über Zuschlagsfaktoren berücksichtigt wird. Im Anschluss werden alle zukünftigen Zahlenströme mit Hilfe von Diskontierungsfaktoren angepasst (Kaufman 1969).

Die Bewertung nach dem TCO-Prinzip umfasst zunächst die Definition und das Vorgehen der LCC-Analyse, ist jedoch weiter ausgelegt, da es zusätzlich auch die Transaktionskosten der Beschaffung einbezieht und die Kosten stets aus Sicht des Käufers erfasst (Krämer 2007, 2009). Unter Transaktionskosten der Beschaffung versteht man beispielsweise Kosten, die während der Aushandlung von Verträgen entstehen (Lenz 1990). Transaktionskosten in der Beschaffung sind besonders im Bereich der Investitionsgüter üblich, z. B. bei der Verhandlung mit verschiedenen potenziellen Lieferanten.

Die Lebenszykluskostenanalyse wird nicht nur als eigenständiges Analysewerkzeug verwendet, sondern als Erweiterung und Ergänzung zu anderen Ansätzen. Neben der verbreiteten Gleichsetzung oder Überlappung der Ansätze des LCC und TCO (Geissdörfer et al. 2009), wird das LCC auch als Ergänzung von Life Cycle Assessments (LCA), ökologischen Analysen, eingesetzt (Lichtenvort und u.a. 2008).

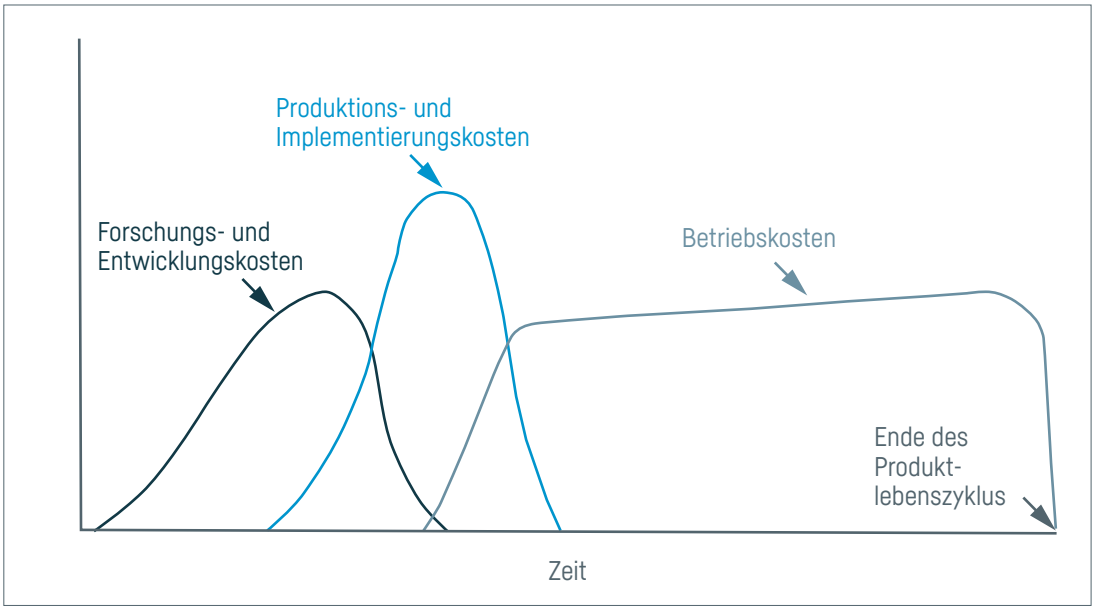


Abbildung 5 Beispielhafte Kategorien der LCC (angelehnt an Woodward 1997)

Es gilt zu bewerten, inwieweit die Ansätze des LCC und des TCO für die Problemstellung der ökonomischen Bewertung von Kreislaufschließungskonzepten von Produkten angewandt werden können.

Sowohl der Ansatz des LCC, als auch das TCO-Prinzip bewerten die entstehenden Kosten von Produkten über den gesamten Lebenszyklus. Jedoch ist die Anwendung ursprünglich für Investitionsgüter angedacht gewesen und nicht für Konsumgüter, die in großer Stückzahl und in Serienfertigung produziert werden. Somit müssen für die Übertragung der Bewertungsansätze für die gegebene Problemstellung die Kostenfaktoren erweitert und überarbeitet werden, um auch Konsumgüter abbilden zu können.

Die Anpassung der Kostenkomponenten über die Zeit, mit Hilfe von Diskontierungswerten ist gerade bei langen erwarteten Lebenszyklen sinnvoll. Er erscheint auch für die vorliegende Problemstellung der Schließung von Kreisläufen als angemessen.

Die Methoden des LCC und TCO in der vorgestellten Grundform betrachten nicht die Möglichkeit, dass ein Lebenszyklus eines Produktes verschiedene Ausgestaltungsformen annehmen kann. Die Kosten werden über eine festgelegte Länge des Produktlebenszyklus ermittelt.

Da die beiden Ansätze lediglich negative Zahlungsströme berücksichtigen und keine positiven Zahlungsströme, ist es an sich nicht möglich die Wirtschaftlichkeit des Produktes zu bewerten, wie es das Ziel des zu entwickelnden Ansatzes ist. Jedoch gibt es Erweiterungen, wie die Messung der Life-Cycle-Performance (LCP), die die Gesamtausgaben über den Lebenszyklus mit dem Gesamtnutzen in Form von Einnahmen oder Erlösen eines Produktes gegenüberstellt (Fleischer et al. 2004). Wie auch der LCC-Ansatz wird der LCP-Ansatz vorwiegend zur Entscheidungsfindung bei kapitalintensiven Investitionsprodukten, wie z. B. Anlagen der Produktionstechnik angewandt.

3.1.2 Materialflusskostenrechnung

Die Materialflusskostenrechnung (MFKR) oder Material Flow Cost Accounting (MFCA) ist ein Bewertungsansatz zur Ermittlung der Kosten, der insbesondere die Kosten von Materialverlusten ausweist. Deswegen wird die MFKR vorrangig angewandt, um Kosteneinsparpotenziale während der Produktion zu identifizieren und verfolgt das Ziel der minimalen Materialverluste und des minimalen Energieeinsatzes, wodurch die Ressourceneffizienz gesteigert wird. Neben Materialien wird auch die Energie als Ressource aufgefasst.

Eine Beschreibung der allgemeinen Rahmenbedingung findet sich in (DIN EN ISO 14051). Im Zentrum der Materialflusskostenrechnung stehen die Prozesse einer Organisation und deren Ermittlung der Materialflüsse- bzw. Bestände, eine Ausweitung entlang der Lieferkette ist möglich. Dennoch zielt die MFKR darauf, Informationen bzgl. Kosten zur internen Entscheidungsfindung bereitzustellen und zieht externe Kosten per se nicht mit ein (DIN EN ISO 14051).

Entsprechend der (DIN EN ISO 14051) werden Materialkosten, Systemkosten und Abfallmanagementkosten unterschieden. Energiekosten können ein Bestandteil der Materialkosten sein, dürfen aber auch getrennt ausgewiesen werden, wie es auch beim internationalen Standard der Fall ist. Diese Kostenkategorien werden für alle Materialflüsse und Materialbestände in Form von monetären Einheiten erhoben. Die Allokation von Kosten und die Verteilung auf einzelne Prozesselemente (Mengenstellen), soll soweit wie möglich vermieden werden.

Die Implementierung der MFKR stellt nicht eine einmalige Bewertung dar, sondern ist ein Prozess, der mehrfach, im Idealfall kontinuierlich im Unternehmen durchlaufen und erfasst wird. Dies ermöglicht es Einsparungen, z. B. durch Prozessveränderungen, aufzuweisen.

Im Vergleich zu anderen Bewertungsansätzen finden sich in DIN EN ISO 14051 Hinweise darauf, dass eine Kreislaufführung und Aufbereitung von Materialien innerhalb der MFKR berücksichtigt werden können, was ein wesentlicher Bestandteil der Problemstellung dieser Bericht ist. Kosten für Wiederaufbereitungen (im üblichen Sinne einem Recycling) sollen wie folgt einbezogen werden:

- Kosten für Wiederaufbereitungsprozesse
- Kostenersparnis im Vergleich zum Einkaufswert, wenn Material intern recycelt werden kann
- Zusätzliche Kosten, die in anderen Mengenstellen durch die Kreislaufführung anfallen, auch wenn diese Mengenstellen nicht direkt im Prozess der Wiederaufbereitung beteiligt sind.

Diese genannten Kostenkomponenten müssen sich auch im zu entwickelten Bewertungsansatz widerspiegeln. Da die MFKR aber im Vergleich zur LCC und TCO nicht das Produkt und dessen Kosten über die Zeit im Fokus hat, sondern eine Systemsicht, allem voran der Produktion, erscheint eine Übertragung des Ansatzes auf die Problemstellung unvorteilhafter im Vergleich zur LCC. Bestehende Lücken der LCC Methode, wie die Berücksichtigung

von Erträgen können nur in sehr geringem Maße (der Einbeziehung der Kostenersparnis beim Recycling) berücksichtigt werden. Der Bewertungsansatz kann nicht für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit herangezogen werden.

3.1.3 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Unter dem Begriff der Wirtschaftlichkeitsberechnung versteht man eine Vielzahl an Bewertungsmethoden, die dazu dienen, die ökonomische Wirtschaftlichkeit von Investitionen zu ermitteln. Entsprechende Methoden lassen sich in statisch und dynamisch unterteilen und werden sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis angewandt. Eine Übersicht kann beispielsweise Krimmling (2018) entnommen werden, der ausführliche Vergleiche zwischen den Verfahren darstellt.

Im Vergleich zu den Kostenmanagementmethoden der Abschnitte 3.1.1 und 3.1.2 werden bei den meisten Ansätzen der Wirtschaftlichkeitsberechnung auch positive Zahlungsströme in Form von Einzahlungen (oder Erlösen) bei der Bewertung berücksichtigt. Dabei wird die Vorteilhaftigkeit über den gesamten Zeitraum, in der das Investitionsobjekt genutzt wird, ermittelt. Denn die Wirtschaftlichkeit im Sinne von Profitabilität tritt zeitverzögert zum Investitionszeitpunkt auf.

Eine auf die ökonomische Vorteilhaftigkeit ausgelegte Bewertungsmethode, wie sie für die definierte Problemstellung verfolgt wird, kann durch den Kapitalwert ermittelt werden.

Die Kapitalwertmethode zählt zu den häufig angewandten dynamischen Methoden der Investitionsrechnung, die zur Ermittlung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit herangezogen wird.

Nach Poggensee (2015) kann der Kapitalwert als „Differenz der barwertigen Ein- und Auszahlungen eines Investitionsobjekts“ aufgefasst werden und repräsentiert einen absoluten Betrag bezogen auf einen Startzeitpunkt, der „den Wert der Investition über die Laufzeit“ widerspiegelt. In Bezug auf zukünftige Ein- und Auszahlungen liegt bei der Berechnung des Kapitalwert Sicherheit vor. Wie die meisten anderen dynamischen Verfahren der Wirtschaftlichkeitsbewertung bzw. der Investitionsrechnung werden zukünftige Ein- oder Auszahlungen, die zur Ermittlung des Kapitalwerts verwendet werden mit Hilfe eines Zinssatzes, an den Zeitpunkt ihres Auftretens angepasst (Poggensee 2015). Dabei erfolgen, in der klassischen Berechnung, Auszahlungen am Anfang des Berechnungszeitraums, gefolgt von Einnahmen in den späteren Perioden.

Andere Berechnungsansätze, wie etwa die dynamische Amortisationsrechnung, bauen auf dem Kapitalwert auf, erscheinen aber nicht als weniger geeignet. Unter der dynamischen Amortisationsdauer kann die Nutzungsdauer verstanden werden, bei der die zeitlich angepassten Einzahlungen die Auszahlungen, die am Anfang der Nutzungsdauer stehen übersteigen (Busse von Colbe et al. 2015).

3.2 Entwicklungs- und Anpassungsbedarf existierender Ansätze

Die vorgestellten Bewertungsansätze sind in der Industrie- und Wissenschaft etablierte Verfahren zur Kostenermittlung und Wirtschaftlichkeitsanalyse. Jedoch bestehen einige Barrieren dieser Ansätze, die die Bewertung unterschiedlicher Kreislaufführungsoptionen für Konsumgüter nicht vollumfänglich ermöglichen.

Alle vorgestellten Verfahren haben zum Ziel ein Produkt, in der Regel ein Investitionsgut, wie eine Fertigungsanlage, über einen kompletten Lebenszyklus zu bewerten. Für ein Investitionsgut kann durch ihre Anwendung ermittelt werden, ob und welcher Verwertungsweg der Kreislaufführung ökonomisch vorteilhaft ist oder die geringsten Kosten verursacht.

Jedoch wird die Berechnung deutlich komplexer, wenn nicht für ein einzelnes Produkt die ökonomisch optimale Nutzungs- und Verwertungsroute gewählt werden soll, sondern für mehrere Produkte der gleichen Art, wie es bei Serienprodukten und ihrer Nutzung der Fall ist. Darüber hinaus ist das zu bewertende Produkt oftmals nicht über die gesamte Zeit im Besitz bzw. Eigentum der gleichen (juristischen) Person, das heißt es ist davon ausgehen, dass ein Teil der Produkte gar nicht zur Verwertung zur Verfügung stehen.

Um eine vollständige Analyse mit Hilfe von Verfahren der Wirtschaftlichkeitsberechnung durchzuführen, wäre es notwendig, alle alternativen Lebenszykluswege und -ausgestaltungen zu berechnen. Faktoren wie die unterschiedliche Länge der Nutzungszeit und alternative mögliche Verwertungsoptionen, z. B. eine Aufarbeitung und ein Recycling, erhöhen die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten, so dass eine vollständige Berechnung alle Alternativen in der industriellen Praxis als nicht möglich erscheint. Auch muss berücksichtigt werden, dass die Kosten verschiedener Verwertungsoptionen nicht nur als Einzelkosten pro Stück vorliegen, sondern auch Fixkosten existieren. Diese fallen unabhängig von der Anzahl der verwerteten Produkte an, können aber dazu führen, dass eine Verwertung nur dann ökonomisch ist, wenn genügend Produkte verwertet werden.

Darüber hinaus muss bei der Berechnung berücksichtigt werden, dass für aufbereitete Produkte auch ein Absatzmarkt bestehen muss, denn nur durch eine weitere Nutzung der Produkte, kann auch eine wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit entstehen. Außerdem gibt es Begrenzungen für die maximale Anzahl an Produkten, die z. B. innerhalb eines Jahres aufbereitet werden können.

Um diesen Anpassungsbedarf umzusetzen und gleichzeitig eine anwendbare Lösung zu ermöglichen, wird ein mathematisches Modell entwickelt, dass mit Hilfe einer nutzerfreundlichen Eingabemaske, einen der ökonomisch optimalen Verwertungs- und Nutzungsweg von Produkten aufzeigt.

4 Modellentwicklung

Die Entwicklung eines linearen mathematischen Optimierungsmodells erlaubt es die identifizierten Problembereiche der zuvor diskutierten Bewertungsansätze zu überwinden. Durch die Lösung des Modells wird die ökonomisch optimale Ausgestaltung der Lebenszyklen der Produkte aufgezeigt. Dabei kann als Ergebnis erkannt werden, welche Verwertungsoptionen abhängig von den Kosten, Erlösen und der Marktsituation, als ökonomisch vorteilhaft gelten.

Der Aufbau dieses Kapitels orientiert sich an der Vorgehensstruktur zur Modellentwicklung nach Rabe et al. (2008). Eine Übersicht findet sich in Abbildung 6.

Zunächst wird in Abschnitt 4.1 die Problemstellung nochmals zusammengefasst und ein entsprechendes Konzeptmodell aufgebaut. Der Abschnitt 4.2 widmet sich dem formalen Modell und erklärt dessen Aufbau. In 4.2.2 wird auf die Voraussetzungen zur Anwendung eingegangen, sowie die Implementierung.

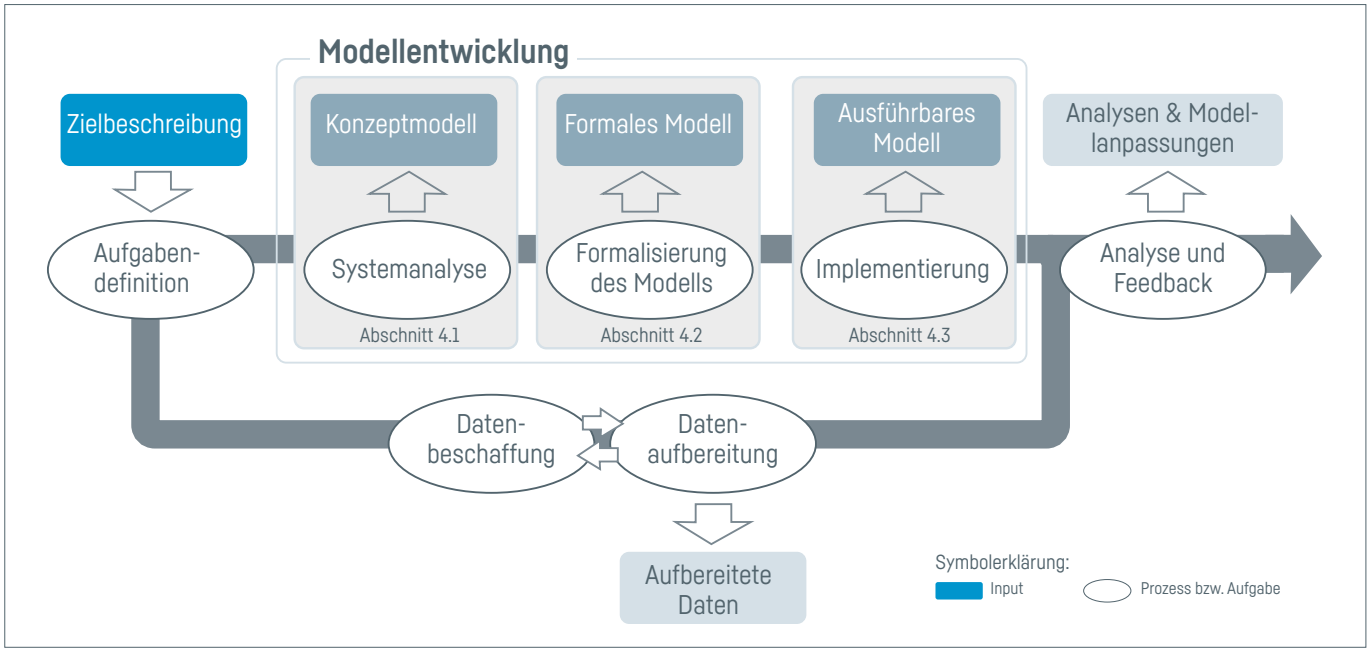


Abbildung 6 Vorgehensstruktur der Modellentwicklung (abgeleitet von Rabe et al. (2008))

4.1 Konzeptmodell

Der entwickelte Bewertungsansatz soll es ermöglichen ökonomisch optimale kreislaufwirtschaftliche Verwertungswege zu identifizieren und dabei alle ökonomischen Auswirkungen unterschiedlicher Lebensphasen (vgl. Abbildung 7) einzubeziehen.

Bereits in der Produktentwicklung werden wichtige Entscheidungen getroffen, die die Kreislaufführung von Produkten beeinflussen (z. B. das Produktdesign und die Materialauswahl) und gleichzeitig fallen finanzielle Ausgaben für die Entwicklung an. An die Phase der Produktentwicklung schließt sich die Herstellung der Produkte an, bevor die Produkte nach ihrem Absatz (z.B. durch Verkauf) in eine Nutzungsphase übergehen. Am Ende der (Erst-) Nutzung erfolgt eine Sammlung und Rückführung der Produkte. Jedoch werden meist nicht alle Produkte eingesammelt.

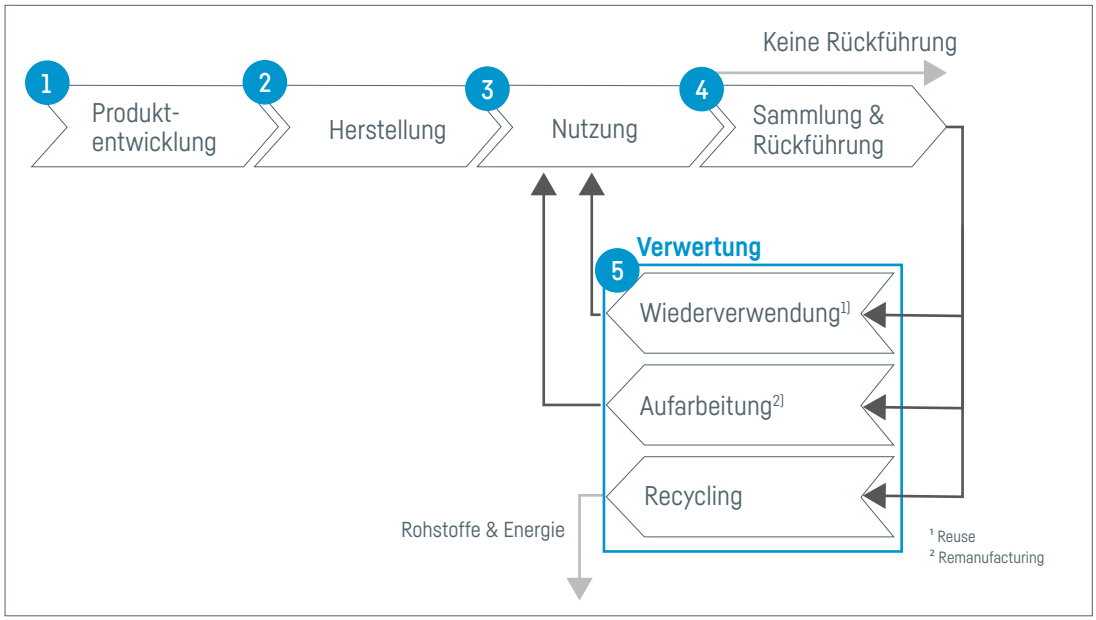


Abbildung 7 Lebensphasen im Konzeptmodell

Für Produkte können unterschiedliche Verwertungswege zur Verfügung stehen (vgl. Kapitel 2). In unserer Bewertung berücksichtigten wir die Verwertungsmöglichkeiten des Recyclings, die Aufarbeitung bzw. das Remanufacturing, sowie die Wiederverwendung (Reuse). Die Auswahl dieser Verwertungsoptionen erscheint geeignet um unterschiedliche Konzepte der Kreislaufführung gemeinsam zu bewerten. Je nach Verwertungsart gelangen die Produkte in eine weitere Nutzungsphase oder es werden Rohstoffe/Energie gewonnen.

Die ökonomische Analyse und Bewertung umfasst eine monetäre Bewertung von Kosten und Erlösen[2], die während oder mit den einzelnen Lebensphasen für jedes Produkt auftreten. Aggregiert über den gesamten Betrachtungszeitraum und alle Produkte wird das ökonomische Optimum aus Kosten und Erlösen gesucht, dies entspricht der Maximierung des Gewinns. Beispielhafte Kostenbestandteile sind Material- und Fertigungskosten bei der Herstellung oder Kosten für das Betreiben einer Rückführungslogistik (Transport- und Lagerkosten).

[2] Eine genaue Abgrenzung der im Rechnungswesen verwendeten Begrifflichkeiten erfolgt nicht im Rahmen dieses Zwischenberichts, die Problematik wird jedoch im Endbericht aufgegriffen werden.

Alle Kosten lassen sich darüber hinaus in zwei Arten aufteilen. So gibt es, aus der Kostenrechnung übernommen, Kosten, die pro Produkt anfallen (z. B. Materialeinzelkosten) und indirekte Kosten (Gemeinkosten), z. B. wie Kosten für die Verwaltung.

Erlöse entstehen für ein Unternehmen dann, wenn Produkte verkauft werden oder Einnahmen, z.B. durch das Vermieten der Produkte, generiert werden. Sie können einmalig anfallen, wenn ein Produkt eine Lebensphase durchläuft (z. B: Verkauf nach der Herstellung) oder aber wiederkehrend, beispielsweise einmal pro Jahr, solange sich ein Produkt in der Nutzung befindet.

Da die Analyse einen Zeitraum von mehreren Jahren einbezieht, um eine Kreislaufführung über alle definierten Phasen zu bewerten, muss außerdem die Möglichkeit bestehen die Kosten und Erlöse über diesen Zeitraum hinweg anzupassen und zu verändern.

4.2 Formales Modell

Das formale Modell wird im folgenden Abschnitt zunächst qualitativ beschrieben, bevor im Anschluss die quantitative, mit anderen Worten mathematische, Formulierung aufgestellt und erläutert wird.

4.2.1 Qualitative Beschreibung

Um ein funktionierendes mathematisches Modell zu formulieren und später zu implementieren, wird das Konzeptmodell einerseits abstrahiert und andererseits um weitere Bestandteile ergänzt. Diese qualitative Beschreibung dient dazu, die abgebildeten Prozessbausteine des Modells darzustellen.

Einen ersten Überblick auf die Weiterentwicklung vom Konzeptmodell zum formalen Modellablauf, kann Abbildung 8 entnommen werden. Neben den im Konzeptmodell bestimmten 5 Phasen, müssen noch weitere Aspekte und Zustände/Prozesse berücksichtigt werden. So müssen z. B. Nachfragen in das Modell aufgenommen werden. Nur wenn eine Nachfrage nach einem aufgearbeiteten oder wiederzuverwendenden Produkt besteht und aufgearbeitete Produkte vorliegen, können diese auch in eine Nutzungsphase eintreten (oder höhere Lebensgeneration[3] erreichen. Die Nachfrage der Produkte, die eine Verwertung durchlaufen haben, muss dabei nicht in voller Höhe erfüllt werden. Für neuproduzierte Produkte wird davon ausgegangen, dass so viele Produkte hergestellt werden, wie Nachfrage zu einem Zeitpunkt nach ihnen besteht.

[3] Ein Produkt in der 1. Nutzungsphase hat die Lebensgeneration eins, mit dem zweiten Eintritt in eine Nutzungsphase spricht man von der 2. Generation usw.

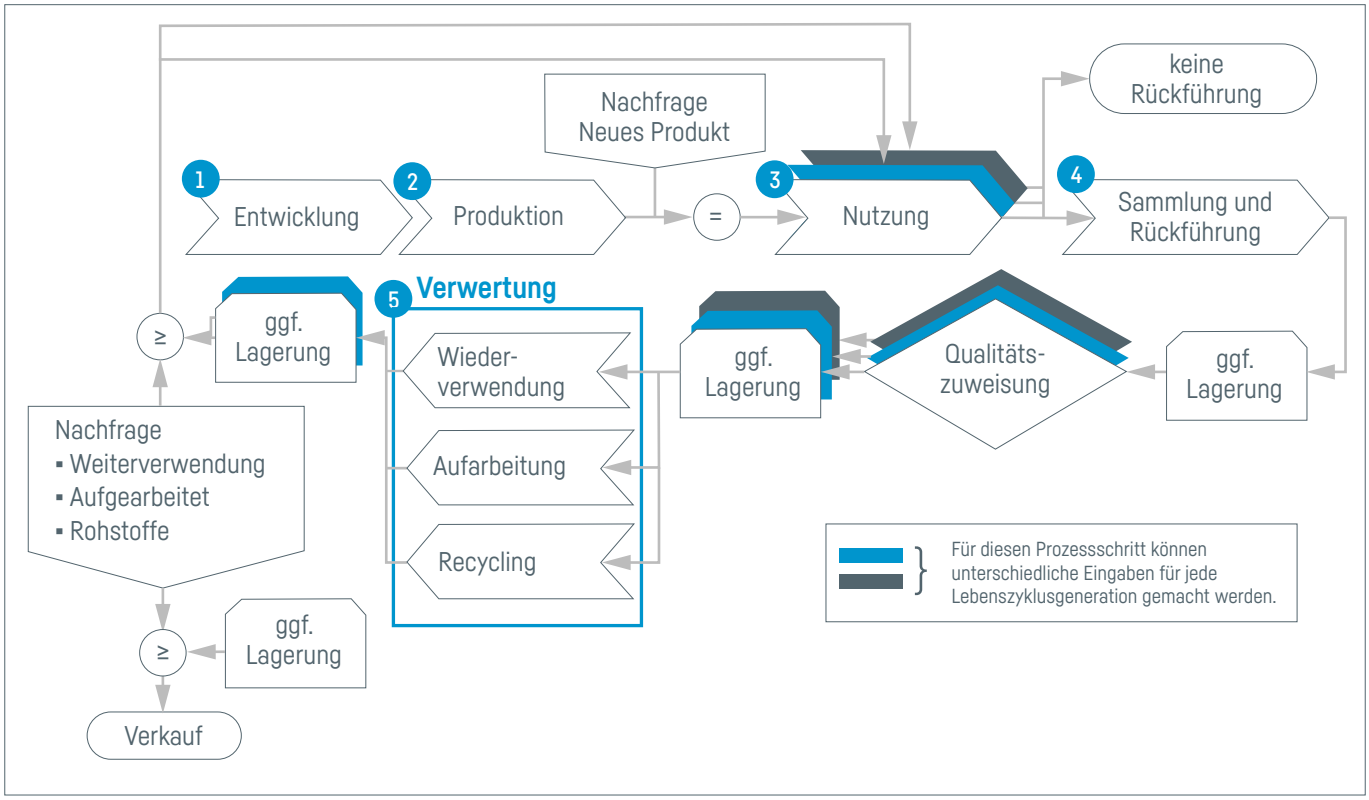


Abbildung 8 Grafisches Layout des modellierten formalen Modells

Neben den verschiedenen Nachfragemengen, wird auch eine Qualitätszuweisung im Modell nach der Sammlung und Rückführung der Produkte modelliert. Bei dieser werden die gesammelten Produkte in unterschiedliche Qualitätsklassen eingeteilt. Das Ergebnis der Qualitätszuweisung bestimmt dann, welchen Verwertungsweg oder welche Verwertungswege ein Produkt nehmen darf. So dürfen nur Produkte wiederverwendet werden, die einen bestimmten Mindestwert an Qualität aufweisen. Eine Aufarbeitung ist auch mit niedrigerer Qualität[4] möglich und Recycling ist für alle gesammelten Produkte zulässig. Dies entspricht der Annahme, dass für eine Aufarbeitung oder eine Wiederverwendung bestimmte Qualitäten der gebrauchten Produkte vorliegen müssen. Die Qualitätszuweisung selbst ist nicht Ergebnis des Models, sondern der Bediener des Tools gibt bereits Annahmen über die Qualität ein (vgl. Abschnitt Implementierung).

In Bezug auf Abbildung 8 soll zuletzt noch die Bedeutung der Bezeichnung „ggf. Lagerung" erklärt werden. Die „Lagerung" von Produkten zwischen den Prozessschritten erlaubt es z. B. die Aufarbeitung von gesammelten Produkten zeitlich (und damit auch rechnerisch/ökonomisch) zu verschieben. Dies kann sinnvoll sein, wenn die Kosten für eine Aufarbeitung beispielsweise für eine größere Anzahl von aufgearbeiteten Produkten pro Produkt günstiger werden.[5] Zum Schluss gilt es noch festzustellen, dass auch der Berechnungszeitraum im formalen Modell näher spezifiziert wird. Dieser ist in der graphischen Prozessbeschreibung nicht ersichtlich.

[4] Oder der hohen Wiederverwendungsqualität
[5] Bei der Berechnung und Analyse kann aber auch durch die Flexibilität der Implementierung einer solchen Lagerung untersagt werden, so dass alle Produkte kontinuierlich im Kreis geführt werden müssen (Ausnahme ist der Fall, dass Produkte recycelt werden oder nicht zurückgeführt werden).

4.2.2 Quantitative Beschreibung

Das qualitativ beschriebene formale Modell wird mit Hilfe von mathematischen Ausdrücken in ein Optimierungsmodell übertragen. Nach der Deklaration der Parameter und Variablen wird das Modell, bestehend aus Zielfunktion und Nebenbedingungen aufgestellt und im Anschluss erläutert. Dabei wird das Modell bereits soweit wie möglich an das ausführbare Modell angepasst.[6] Ein Beispiel hierfür ist, dass genau die drei in der Implementierung berücksichtigten Verwertungswege berücksichtigt werden und nicht noch weitere.

Parameter	
cr^g	Sammlungsrate der Produkte am Ende der Nutzung in Abhängigkeit ihrer Generation
rev^i	Erlös bei Absatz eines Produktes Typ i
pro_t	Produktion an neuen Produkten in Periode t
M	Eine sehr große Zahl
$c^{dis}, c^{hd}, c^i, c^h$	Maximale Kapazitäten der Prozesse der Demontage, des Lagers der demontierten Produkte, der verschiedenen Verwertungsoptionen und der aufbereiteten und noch nicht verkaufen Produkte
$proc_t^f$	Fixe Produktionskosten in Periode t
tc_t^f	Fixe Transportkosten in Periode t
uc_t^f	Fixe Kosten, die während der Nutzung in Periode t aufkommen
dc_t^f	Fixe Demontagekosten in Periode t
hdc_t^{if}	Fixe Kosten für Lager von demontierten, aber noch nicht aufgearbeiteten Produkten i in der Periode t
hc_t^{if}	Fixe Kosten für ein Lager von aufgearbeiteten, aber noch nicht verkauften Produkten i in der Periode t
rc_t^{if}	Fixe Verwertungskosten für eine Verwertungsoption für ein Produkt i in der Periode t
$proc_t^v$	Variable Produktionskosten in Periode t pro Produkt
uc_t^f	Variable Nutzungskosten in Periode t pro Produkt
tc_t^v	Variable Transportkosten in Periode t pro Produkt
dc_t^v	Variable Demontagekosten in Periode t pro Produkt
hdc_t^{iv}	Variable Lagerkosten pro Produkt i das eine Periode t nach der Demontage
hc_t^{iv}	Variable Lagerkosten pro aufbereitetem Produkt i in Periode t
nt_{at}^g	Anteil der Produkte der Generation g in Periode t, die ihre Nutzung beenden, wenn sie in Periode a in die Nutzungsphase eingetreten sind

[6] Dies bedeutet, dass die mathematischen Formulierungen der Implementierung entsprechen.

Variablen	
sa_t^{ig}	Absatzmenge des Produktes i der Generation g in Periode t
y_t^{pro}	Binärvariable, nimmt den Wert eins an, wenn in Periode t eine Produktion erfolgt, sonst 0.
use_t	In Nutzung befindliche Produkte (alle Arten und Generationen) in Periode t
$eou_t^{i,g}$	Produkte des Typs i der Generation g deren Nutzung in Periode t endet.
$y_t^{use}, y_t^{dis}, y_t^{ret}, y_t^{i}$	Binärvariable, nimmt den Wert 1 an, wenn in Periode t Produkte in der Nutzung sind, zurückgeführt werden oder die jeweilige Verwertungsprozesse durchgeführt werden. sonst 0.
y_t^{hd}	Binärvariable, nimmt den Wert 1 an in Periode t demontierte Produkte gelagert werden, aber noch nicht aufgearbeitete Produkte sind, sonst 0.
y_t^{ih}	Binärvariable, nimmt den Wert 1 an in Periode t Produkte i für aufgearbeitete, aber noch nicht verkaufte Produkte im Lager, sonst 0.
$er_t^{i,i<i*,g}$	Excess Recovery, heißt, Summe aller Produkte des Typs i der Generation g, die in einer Periode t einer niedrigeren Verwertung zugeführt werden.
pro_t	Sich in der Produktion befindliche Teile in Periode t
ret_t^{ig}	Anzahl der zurückgeführten Produkte des Typs i und der Generation g in Periode t
dis_t^{ig}	Anzahl der demontierten Produkte des Typs i und der Generation g in Periode t
hd_t^{ig}	Anzahl der gelagerten, aber noch nicht aufbereiteten Produkte der Qualität i und der Generation g in Periode t
r_t^{ig}	Anzahl der Produkte der Qualität i, die Verwertung i in Periode t durchlaufen.
h_t^{ig}	Anzahl der aufbereiteten Produkte des Typs i und der Generation g in Periode t

Zunächst werden die verwendeten Indices erläutert, da sich diese sowohl in der Zielfunktion als auch den Nebenbedingungen wiederfinden. Der Index T steht für den Berechnungshorizont, wobei t eine Periode, d.h. eine festgelegte Zeiteinheit innerhalb von T ist. Realistisch erscheint die Wahl eines Jahres als Periode. Der Berechnungshorizont hingegen sollte an das jeweils zu bewertende Produkt angepasst werden.

Der Index i steht für die Absatzart des Produktes, oder auch die zuletzt durchgeführte Wertschöpfung. Insgesamt gibt es vier unterschiedliche Absatzmöglichkeiten.

i	**Absatzart bzw. Verwertungsart und Qualität**
1	Neues Produkt
2	Wiederverwendetes Produkt
3	Aufgearbeitetes Produkt
4	Produkt zum Recycling

Der Index i wird auch verwendet, um zurückgeführten Produkten eine Qualität zuzuweisen, die jeweils einer (idealen) Verwertungsoption entspricht. Diese kann zwischen den Werten 2 und 4 liegen, wobei Rückläufer mit der Qualität 2 eine höhere Qualität haben, als solche in denen i = 4 gilt.

Der Index G steht für Generation. Die Generation gibt an, ob es sich um ein neues Produkt handelt, dass die Generation 1 hat (g = 1). Wurde es bereits einmal werdet, gehört es zur zweiten Generation (g = 2), entsprechend kann die Reihe fortgesetzt werden. Maximal können vier Generationen im implementierten Bewertungsmodell berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass Produkte bis zu drei Mal verwertet werden können. Realistisch erscheint jedoch eine einmalige Aufarbeitung oder Wiederverwendung und ein Recycling nach der zweiten Nutzungsphase.

$$
\begin{aligned}
Max\,P = & \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\sum_{g=1}^{G} rev^{i} \cdot sa_{t}^{ig} \\
& - \sum_{t=1}^{T}(y_{t}^{pro} \cdot proc^{f} + y_{t}^{use} \cdot uc_{t}^{f} + y_{t}^{dis} \cdot dc_{t}^{f} + y_{t}^{ret} \cdot tc_{t}^{f} + y_{t}^{hd} \\
& \cdot hdc_{t}^{f}) \\
& - \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}(y_{t}^{i} \cdot rc_{t}^{if} + y_{t}^{ih} \cdot hc_{t}^{if}) \\
& - \sum_{t=1}^{T}(pro_{t} \cdot proc_{t}^{v} + use_{t} \cdot uc_{t}^{v}) \\
& - \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\sum_{g=1}^{G}(ret_{t}^{ig} \cdot tc_{t}^{v} + dis_{t}^{ig} \cdot dc_{t}^{v} + hd_{t}^{ig} \cdot hdc_{t}^{iv} + (r_{t}^{ig} + er_{t}^{i,i<i^{*},g}) \\
& \cdot rc_{t}^{iv} + h_{t}^{ig} \cdot hc_{t}^{iv})
\end{aligned}
\tag{1}
$$

Die Zielfunktion (1) maximiert den über den gesamten Zeitraum und alle Produkte berechneten Gewinn. Dieser setzt sich aus der Differenz des Umsatzes aller Produkte und den Kosten zusammen, die den verschiedenen Lebensphasen zuzuordnen sind.

Insgesamt besteht die dargestellte Zielfunktion aus fünf Termen. Der erste Term repräsentiert den Umsatz, der durch den Verkauf aller Produkte über den gesamten Berechnungszeitraum (T) erreicht wird. Der zweite Term berücksichtigt Fixkosten, für die Produktion, für in Nutzung befindliche Produkte und für die Durchführung von Logistik-/und Sammlungskosten, sowie Demontageprozesse und Lagerung. Der dritte Term entspricht den Fixkosten, die bei Durchführung von verschiedenen Verwertungswegen aufkommen. Die Terme 4 und 5 repräsentieren die zu den Termine 2 und 3 gehörenden variablen Kosten.

Ein sechster Term könnte ergänzt werden, der die Entwicklungskosten abbildet. Diese sind selbst keine Entscheidungsgröße des Modells, werden aber in den Ergebnissen der Implementierung einbezogen, da diese zeitlich stets vor der Produktion entstehen.

Bei der Lösung der Zielfunktion müssen diverse Nebenbedingungen eingehalten werden. Diese werden im Folgenden entsprechend der Anordnung über den Lebenszyklus der Produkte vorgestellt.

Die Nebenbedingung (2) stellt dar, dass alle produzierten Neuteile, die immer der ersten Generation angehören, auch in der Periode der Produktion verkauft werden und in den Markt gelangen.[7] Wenn die Produktion in einer Periode t stattfindet, fallen auch die fixen Produktionskosten in dieser Periode an, unabhängig davon, wie viele Produkte produziert werden (Nebenbedingung (3)).

$$\textit{unter Einhaltung der Nebenbedingungen}$$

$$sa_t^{11} = dem_t^1 \quad \forall t = 1, \dots, T$$
$$sa_t^{1g} = 0 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \forall g = 2, \dots, T \tag{2}$$

$$sa_t^{11} \leq y_t^{pro} \cdot M \qquad \forall t = 1, \dots, T \tag{3}$$

Die Nebenbedingung (4) setzt die Menge der in Nutzung befindlichen Produkte einer Periode gleich den in der letzten Periode bereits in Nutzung befindlichen Produkten, plus den neu hinzukommenden Produkten minus den Produkten, die ein Nutzungsende erreichen. Da Produkte, die recycelt werden, das Bewertungssystem verlassen, entfallen sie in der Nutzungsphase, sowie den weiteren Schritten des Bewertungsprozesses.

$$use_t = use_{t-1} + \sum_{g=1}^{G} \sum_{i=1}^{I-1} (sa_t^{ig} - eou_t^{ig}) \quad \forall t = 2, \dots, T; \forall g = 1, \dots, G$$
$$use_1 = \sum_{g=1}^{G} \sum_{i=1}^{I-1} (sa_t^{ig} - eou_t^{ig}) \quad \forall t = 2, \dots, T; \ \forall g = 1, \dots, G \tag{4}$$

[7] Alternativ kann auch angenommen werden, dass sich Produktion und Absatz der Teile nicht entsprechen müssen und eine der beiden Variablen größer als die andere sein darf.

Die Anzahl der Produkte[8], deren Nutzung beendet wird, wird mit Formel (5) berechnet. Dabei kann die Nutzungsdauer der Produkte in jeder Generation variieren. Produkte, die also zuvor schon einmal aufgearbeitet oder wiederverwertet wurden und damit mindestens der Generation 2 angehören, können also eine andere Nutzungsdauer haben als neue Produkte.

$$eou_t^{ig} = \sum_{t=1}^{t} sa_t^{ig} \cdot nt_{at}^{g} \cdot \quad \forall g = 1, \dots, G; \forall i = 1, \dots, I-1; \forall \text{ a,t } \in T: a \leq t \qquad (5)$$

$$eou_t^{4g} = 0 \cdot \quad \forall g = 1, \dots, G; \ \forall \text{t} = 1, \dots, T$$

Die Anzahl an Produkten, die ein Nutzungsende erreichen, wird mit der Sammlungsrate multipliziert, um die Anzahl der zurückgeführten Produkte zu bestimmen (6). Dabei wird ein Zeitverzug von einer Periode berücksichtigt.

$$eou_{t-1}^{ig} \cdot cr^g = ret_t^{ig} \quad \forall g = 1, \dots, G; \forall i = 1, \dots, I; \forall t = 2, \dots T$$
$$ret_1^{ig} = 0 \quad \forall g = 1, \dots, G; \forall i = 1, \dots, I \qquad (6)$$

Alle Produkte, die aus einer Nutzung zurückgeführt werden, werden in der nächsten Periode demontiert (7). Die Modellierung der Demontage erlaubt es, auch nur die Verwertung einzelner Komponenten oder Baugruppen von Produkten zu bewerten.[9] Die (demontierten) Produkte o-der Bauteile werden außerdem aufgrund ihrer Qualität (qi) einzelnen Lagerklassen zugeteilt. Die Zuteilung einer Lagerklasse bestimmt, welche weiteren Verwertungsrouten das Produkt nehmen kann.

$$ret_{t-1}^{ig} \cdot q^i = dis_t^{ig} \ \forall g = 1, \dots, G; \forall i = 1, \dots, I; \forall t = 2, \dots T$$
$$dis_1^{ig} = 0 \ \forall g = 1, \dots, G; \forall i = 1, \dots, I; \forall t = 2, \dots T \qquad (7)$$

Die Nebenbedingung (8) bestimmt, dass eine festgelegte Demontagekapazität pro Periode nicht überschritten werden darf und (9) wird verwendet, damit mögliche Fixkosten in die Bewertung einbezogen werden, sobald Demontageaktivitäten durchgeführt werden.

$$\sum_{g}^{G} \sum_{i}^{I} dis_t^{ig} \leq \text{c}^{dis} \quad \forall t = 1, \dots, T \qquad (8)$$

$$\sum_{g}^{G} \sum_{i}^{I} dis_t^{ig} \leq y^{dis} \cdot M \quad \forall t = 1, \dots, T \qquad (9)$$

[8] Der Generation g, die zuvor einen Produktions- oder Verwertungsprozess des Typs i durchlaufen haben.
[9] Das Modell wurde zunächst für Fragestellungen der automobilen Wertschöpfungskette entwickelt, wo die Demontage ein essenzieller jedes Verwertungsprozesses ist.

Die Nebenbedingung (10) definiert die Lagermengen zurückgeführter Produkte (aller Generationen und Lagerqualitäten), die noch keiner Verwertung zugeführt wurden. Diese ergeben sich aus der Differenz des Lagerbestands der letzten Periode, neu hinzukommender Rückläufer der entsprechenden Generation sowie Qualität und der verwerteten Produkte.

$$hd_t^{ig} = hd_{t-1}^{ig} + \sum_{i=1}^{I} dis_t^{ig} - r_t^{ig} - \sum_{i<i*} er_t^{i,i<i^*,g} \quad \forall\, i = 2, \dots, I; \forall g = 1, \dots, G; \quad \forall t = 2, \dots T \tag{10}$$

$$hd_1^{ig} = 0 \quad i = 1, \dots, I; \forall g = 1, \dots, G;$$

Die Nebenbedingung (11) wie auch zuvor (8) gilt der Einhaltung einer maximalen Kapazität, in diesem Fall einer max. Lagerkapazität. Dabei wird davon ausgegangen, dass es nur ein Lager für alle Qualitäten und Generationen gibt. Die Nebenbindung (12) hat die gleiche Funktion wie (9).

$$\sum_{g}^{G} \sum_{i}^{I} hd_t^{ig} \leq c^{hd} \quad ; \forall t = 1, \dots, T \tag{11}$$

$$\sum_{g}^{G} \sum_{i}^{I} hd_t^{ig} \leq y_t^{hd} \cdot M \quad ; \forall t = 1, \dots, T \tag{12}$$

Die Nebenbindung (13) definiert das Einhalten der Kapazitätsbeschränkung der Verwertungsoptionen (i), die in jeder Periode gilt.

$$\sum_{g}^{G} \sum_{i}^{I} (r_t^{ig} + \sum_{i <i^*} e_{rt}^{ii^*g}) \leq c^i \quad \forall i, i^* = 2, \dots I: i < i^*; \forall t = 1, \dots, T \tag{13}$$

$$r_t^{1g} = 0 \quad \forall g = 1, \dots G; \forall t = 1, \dots, T$$

$$er_t^{ig} = 0 \quad \forall i, i^* = 1, I; \forall g = 1, \dots G; \forall t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{g}^{G} \sum_{i}^{I} (r_t^{ig} + \sum_{i<i^*} er_t^{ii^*g})^* \leq M \cdot y_t^i ; \forall i, i^* = 1, \dots, I: i < i^*; \forall t = 1, \dots, T \tag{14}$$

Die Lagermenge der aufgearbeiteten Produkte (15) ergibt sich aus der Differenz aus Verwertung und Absatz, sowie einem möglichen Lagerbestand der letzten Periode. Dabei ist zu beachten, dass sich die Generation der Produkte nach der Verwertung um eins erhöht. (18)(19).

$$h_t^{ig+1} = h_{t-1}^{ig+1} + \sum_i^I (r_t^{ig} + \sum_{i<i^*} er_t^{ii^*g}) - sa_t^{ig+1} \quad \forall i = 2, \dots, I;$$
$$\forall g = 1, \dots, G-1; \ \forall t = 2, \dots, T \qquad (15)$$
$$h_1^{ig} = 0 \ \forall i = 1, \dots, I; \ \forall g = 1, \dots, G$$

Auch für die Lagerhaltung der aufgearbeiteten Produkte müssen maximale Lagerkapazitäten eingehalten werden (16), wobei damit getrennte Lager für die aufbereiteten Produkte modelliert werden. Recycelte Produkte, mit anderen Worten die zurückgewonnenen Rohstoffe werden nicht gelagert. In dem Modell wird davon ausgegangen, dass diese etwa auf einem Rohstoffmarkt verkauft werden oder es sich z. B. um ein Recycling in Form von Energiegewinnung handelt. Der Logik von Nebenbedingung (16) folgernd, wird mit (17) die Grundlage zur Einbeziehung der fixen Lagerkosten gelegt.

$$\sum_g^G \sum_{i=1}^I h_t^{ig} \leq c^{ih} \quad \forall i = 1, \dots, I; \ \forall t = 1, \dots, T \qquad (16)$$

$$\sum_g^G \sum_r^R h_t^{ig} \leq y_t^{ih} \cdot M \quad ; \forall i = 2, \dots, I-1 \forall t = 1, \dots, T \qquad (17)$$

Der Absatz aller Produktarten in einer Periode darf die jeweilige Nachfrage nach der Produktart in einer Periode nicht überschreiten (18) außerdem gehören die verwerteten Produkte ($i \geq 2$) mindestens der zweiten Generation an.

Die Nebenbedingungen (19) bis (20) deklarieren die Entscheidungsvariablen als nicht negativ oder als Binärvariablen.

$$\sum_g^G sa_t^{ig} \leq dem_t^i \quad \forall i = 1, \dots, I; \forall t = 1, \dots, T$$
$$sa_t^{i1} = 0 \quad \forall i = 2, \dots, I; \forall t = 1, \dots, T \qquad (18)$$

$$pro_t, \ sa_t^{ig}, use_t, eou_t^{i,g}, r_t^{ig}, dis_t^{ig}, hd_t^{ig}, r_t^{ig}, h_t^{ig}, \geq 0 \qquad (19)$$
$$\forall i = 1, \dots, I; \ \forall g = 1, \dots G; \ \forall t = 1, \dots, T$$

$$y_t^{use}, y_t^{dis}, y_t^{ret}, y_t^i, \ y_t^{ihd}, y_t^{ih}, y_t^{pro} \in \{0,1\} \qquad (20)$$

Die Einhaltung der Nebenbedingung (21) kann im ausführbaren Modell optional gewählt werden. Wenn diese Nebenbedingung bei der Optimierung einfließt, werden die fixen Kosten einer Verwertung für alle Perioden ab ihrer ersten Durchführung dieser Verwertung in der Zielfunktion berücksichtigt, auch wenn in einzelnen Perioden keine Durchführung des Verwertungsprozesses erfolgt.

$$y_{t-1}^{i} \leq y_{t}^{i} \; \forall i = 1, \dots, I; \forall t = 2, \dots, T \quad (21)$$

4.3 Ausführbares Modell

Das formulierte Optimierungsmodell wurde in einer Microsoft Excel® Umgebung ausgeführt und lässt sich durch die Integration des Open Solver[10] lösen. Eine Ausführung des Models in Microsoft Excel® mit der Open Solver Erweiterung, übersteigt bereits die in Excel zulässige maximale Komplexität entsprechender Optimierungsmodelle.

Auf den Einsatz möglicher spezialisierter Software, die die Lösung entsprechender Modelle erlaubt, wurde nicht gewählt, um die Einsetzbarkeit der Berechnung auch außerhalb des Projektes zu erlauben. Gleichzeitig führte die Wahl der Implementierungsumgebung zu Einschränkungen in Bezug auf die Modellierungsmöglichkeiten. Dieser Umstand wurde im Rahmen der Projektteilnehmer diskutiert und entsprechend zur Kenntnis genommen.

Die Implementierung setzt die Modelllogik des mathematischen Modells aus Abschnitt 4.2.2 um. Jedoch wurden an einigen Stellen zusätzliche Einschränkungen getroffen. So können Produkte z. B. max. 4 Nutzungsphasen durchlaufen. Dieser Wert erscheint für die meisten Produkte oder Bauteile hochgewählt, jedoch zeigt das Reuse Beispiel der Mehrwegflaschen, dass auch Konstellationen bestehen, in denen noch häufigere Nutzungsphasen denkbar sind.

Abbildung 9 fasst die Funktionsweise der Implementierung zusammen. Die in der linken Spalte genannten Eingabedaten und Einstellungen sind durch den Benutzer zu tätigen. Die Berechnung des Modells ermittelt die Maximierung des Gewinns, wobei die aufgeführten Nebenbedingungen bei der Findung einer optimalen Lösung eingehalten werden. Der Benutzer des implementierten Modells erhält die mathematischen Ergebnisse. Durch das mehrfache Ausführen des Tools z. B. durch Änderung der verfügbaren Kreislaufführungsoptionen oder einzelner Kostenkomponenten, können unterschiedliche Szenarien innerhalb weniger Sekunden berechnet werden.

[10] DInformationen und Download https://opensolver.org/

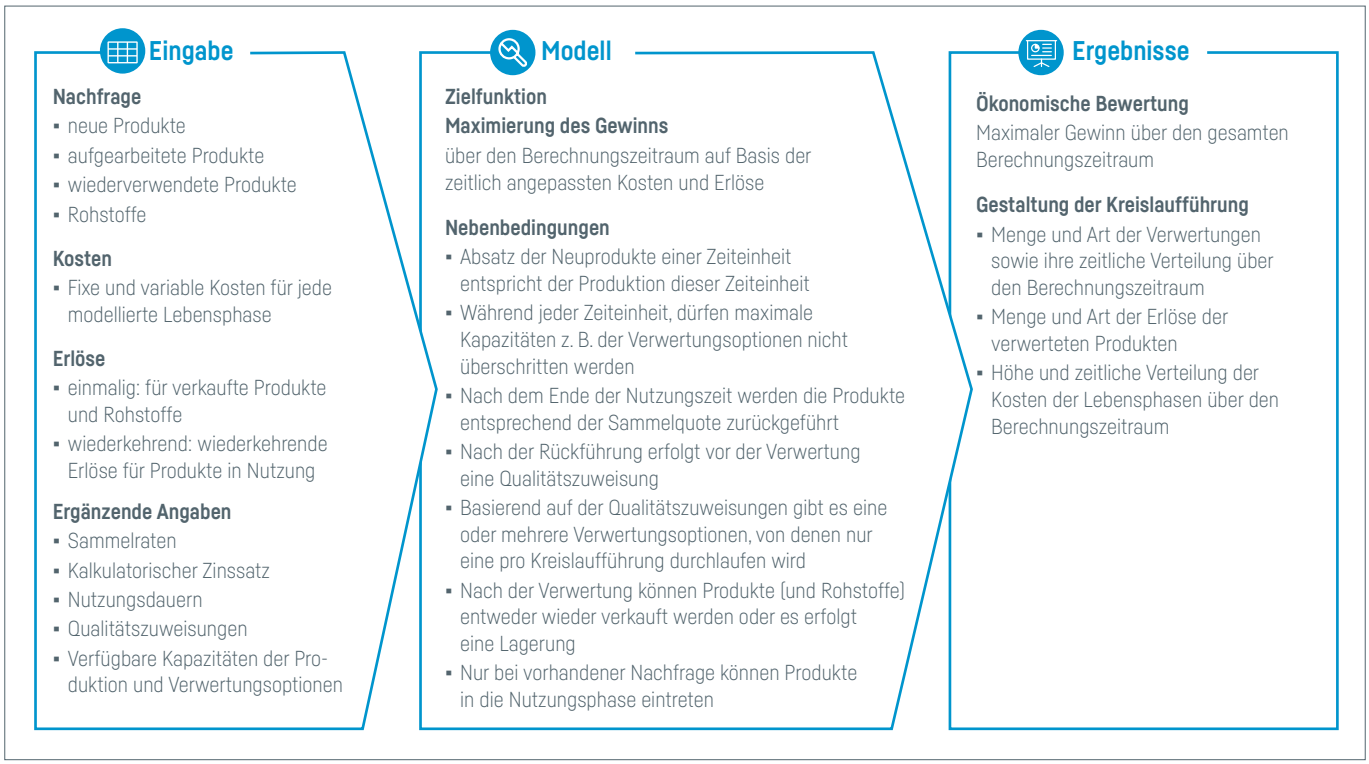


Abbildung 9 Funktionsprinzip der Modellierung

Im Abschnitt 4.3.1 wird auf die grafische Benutzeroberfläche mit dem Schwerpunkt der benötigten Dateneingaben eingegangen, während der Abschnitt 4.3.2 die Art und den Umfang der Ergebnisdarstellung erläutert. Abschnitt 4.3.3 dient dazu, die Voraussetzungen zur Problem adäquaten Nutzung des implementierten Modells aufzuzeigen.

4.3.1 Dateneingabe

Die Bedienung des Tools setzt sich für den Benutzer aus zwei Schritten zusammen. Zunächst werden alle benötigten Daten in einem Arbeitsblatt in vorgegebene Eingabefelder eingetragen. Dabei erfolgt eine Überprüfung auf Konsistenz und Logik der Eingabedaten durch Microsoft Excel® bzw. durch im Tool hinterlegte Funktionen VBA (Visual Basic for Applications). Im Anschluss startet der Bediener durch das Anklicken einer Befehls-Schaltfläche die Berechnung des Tools und wird auf ein Arbeitsblatt mit der Darstellung der Ergebnisse weitergeleitet. Um das Tool bedienungsfreundlich auszulegen, wurde im Projektverlauf ein Leitfaden zur Bedienung entwickelt. Außerdem sind auf dem Eingabedatenblatt Befehls-Schaltflächen angelegt mit denen Erklärungs-/Hilfstexte aufgerufen werden können (s. Anhang 7).

Die Bedienung des Tools wurde durch mehrere Projektmitarbeiter getestet und auf Logik und Konsistenz überprüft. Im Folgenden wird auf die Eingabe der Daten eingegangen. Das Modell wurde bereits im Abschnitt 4.2 vorgestellt. Auf die Ergebnisse bzw. ihre Interpretation wird im Kapitel 5 eingegangen.

1. Eingaben in Bezug auf das modellierte Kreislaufsystem:

Am Beginn jeder Bewertung müssen einige grundlegende Angaben gemacht werden, die den Berechnungsrahmen und das bewertete Kreislaufsystem bestimmen.

a) Berechnungszeitraum:

Es wird zunächst abgefragt wie viele Jahre bei der Berechnung einbezogen werden. Die berücksichtige Zeit sollte auf Grundlage des zu bewerteten Produktes und dessen erwartete Nutzungszeit sowie die Anzahl der möglichen Kreislaufführungen gewählt werden. Beispielsweise ist für ein Smartphone die durchschnittliche Nutzungszeit deutlich kürzer, als für ein Automobil. Während bei einem Berechnungszeitraum von zehn Jahren ein Smartphone mehreren Lebensgenerationen durchlaufen kann, ist davon auszugehen, dass der Großteil der Automobile nach zehn Jahren noch nicht mehrere Lebenszyklen durchlaufen hat. Im Falle des Automobils könnte dies bei einem Berechnungszeitraum von zehn Jahren dazu führen, dass eine Aufarbeitung als nicht ökonomisch erachtet wird. Grundsätzlich beträgt der Berechnungszeitraum max. 50 Jahre.

b) Auswahl möglicher Verwertungsoptionen:

Grundsätzlich können Reuse, Remanufacturing und Recycling gleichzeitig in die Bewertung einbezogen werden. Weil aber nicht für alle Produkte davon auszugehen ist, dass z. B. eine Weiterverwendung technisch und/oder gesetzlich möglich ist, können auch nur zwei Verwertungsoptionen in die Berechnung integriert werden. Im Gegensatz zur Weiterverwendung und der Aufarbeitung wird eine Recyclingfähigkeit des Produktes immer als obligatorisch möglich erachtet.

c) Substituierbarkeit von Verwertungsoptionen:

Bei der Bewertung und Analyse einer optimalen Kreislaufführung von Produkten kann neben der Anzahl und Art der Verwertungsoptionen (b) auch angegeben werden, ob Produkte immer entsprechend ihrer zugewiesenen Qualität verwertet werden müssen oder auch ein sogenanntes Downcycling (Kaskadierung) zugelassen wird, d. h. Produkte, die noch wiederverwertet werden können, dürfen, wenn ökonomisch präferiert, auch recycelt werden.

d) Dauer der Nutzungsphasen und Qualitätszuweisung:

Der Bediener muss außerdem entscheiden wie viele Nutzungsphasen ein Produkt maximal durchlaufen kann und ob sich die erwarteten Dauern der Nutzungsphasen über die Anzahl der Nutzungsphasen ändert. Dies bewirkt, z. B. die Möglichkeit zur Darstellung des Sachverhalts, dass ein Neuprodukt länger genutzt wird, als ein Aufgearbeitetes.

Die Dauer der Nutzungsphasen wird über eine Dreiecksverteilung abgebildet. Hierzu werden Eingaben über die minimale, maximale und am häufigste erwartete Nutzungsdauer gemacht.

Die Qualitätszuweisung erfolgt dadurch, dass Eingaben darübergemacht werden, wie viel Prozent der Produkte nach der 1. (2. etc.) Nutzungsphase noch welche Qualitätsstufe erfüllen.

2. Eingaben zu Kosten:
Für die Eingabe der Kosten gibt es in Bezug auf den Detailgrad der Kostenangaben mehrere Optionen. Pro Prozessschritt können im Lebenszyklus Kosten aufgeteilt und nach fixen und variablen Kosten angegeben werden. Fixe Kosten entstehen pro Jahr, wenn dieser Prozessschritt von mindestens einem Produkt durchlaufen wird, unabhängig von der Anzahl an Produkten, die diesen Prozessschritt durchlaufen. Sie haben somit einen Gemeinkostencharakter. Variable Kosten hingegen können als Einzelkosten aufgefasst werden und entstehen pro Produkt.

Die alternative Eingabemöglichkeit besteht darin, die Kosten, die ggf. aus einer Kalkulationsstruktur im Unternehmen vorliegen (z. B. aus einem SAP-System), den einzelnen Phasen im Lebenszyklus zuzuordnen.

Unabhängig von der Eingabeart kann ein kalkulatorischer Zinssatz angegeben werden, der es ermöglicht, die Kosten über den Berechnungszeitraum anzupassen.

3. Eingaben zu Erlösen:
Erlöse werden pro Produkt eingegeben und zunächst wird davon ausgegangen, dass es sich um einmalige Erlöse handelt, also z. B. den Verkauf eines neuen Produktes oder des Erlöses aus dem Recycling eines Bauteils.

Um neben dem Verkauf andere Erlösoptionen abzubilden, z. B. einen jährlichen Leasing-/oder Mieterlös, können die Eingabefelder der Kostenstruktur genutzt werden. Dies bedeutet, dass für das Kostenfeld „Use“ auch negative Eintragungen möglich sind. Durch den Aufbau des hinterlegten mathematischen Modells, entspricht dies dann wiederum einem Erlös bei der Berechnung.

4. Eingaben zur Nachfrage:
Für die Gesamtanzahl an Jahren, die in die Analysen einbezogen werden sollen, müssen Eingaben in Bezug auf die erwarteten Nachfragen eines bestimmten Produkttyps gemacht werden. Für Neuprodukte muss diese Nachfrage in der Berechnung immer erfüllt werden. Für aufgearbeitete/weiterverwendete Produkte muss nicht die gesamte Nachfrage bei der Berechnung erfüllt werden. Es können aber maximal so viele Produkte in eine neue Nutzungsphase eintreten, wie Nachfrage nach ihnen besteht.

4.3.2 Dokumentation der Ergebnisse

Die Ergebnisse lassen sich in verschiedene Bereiche gliedern. Zunächst gibt es den Gewinn über den gesamten Berechnungszeitraum auf Basis der zeitlich angepassten Kosten und Erlöse. Kosten und Erlöse werden außerdem getrennt aufgeteilt in einzelne Teilprozesse (z. B. Aufbereitung) mitgeteilt.

Eine größere Bedeutung im Vergleich zu den absolut abgetragenen Werten, kommt der Interpretation der Ergebnisse zu. So kann es z. B. sein, dass eine Aufarbeitung, obwohl als Option möglich, nicht ausgewählt wird und alle Produkte der Verwertungsoption Recycling zugeführt werden.

Die Ergebnisse zeigen außerdem, ab wann eine entsprechende Verwertungsoption zur Verfügung stehen sollte. Aufgrund der Existenz von fixen und variablen Kosten, kann sich die Etablierung mancher Verwertungskonzepte auch erst mit einem Zeitverzug als ökonomisch optimal ergeben. So kann es sein, dass zwar erste aufarbeitungsfähige Rückläufer bestehen, aber eine Aufarbeitung aufgrund hoher Fixkosten erst einige Jahre später, wenn z. B. eine höhere Anzahl an Rückläufern vorhanden ist, ökonomisch wird.

4.3.3 Voraussetzungen zur Anwendung

Um die Berechnungsmethode in der implementierten Form anwenden zu können und die Ergebnisse richtig zu interpretieren, müssen einige Grundvoraussetzungen erfüllt sein.

Ähnlich wie bei einer MFKA (vergleiche Abschnitt 3.1.2), müssen die einzelnen Dateneingaben so gewählt werden, dass sie miteinander vergleichbar sind. Dies gilt insbesondere für die verschiedenen Kosten der Aufbereitung, aber auch für Lager- und Transportkosten. Deswegen sollte vor der Anwendung stets eine Prüfung der Eingabedaten auf Konsistenz erfolgen, was nur durch den Anwender selbst möglich ist.

Die Konsistenz zeigt sich z. B. dadurch, dass die Eingaben der einzelnen fixen Kosten in einem passenden Verhältnis zur Kapazität der einzelnen Prozesse stehen sollten. Werden Kostendaten eingegeben, die sich auf ein Lager mit 1.000 Lagereinheiten für das Produkt beziehen, so sollte die Kapazität auch auf 1.000 gesetzt werden. Die fixen Kosten für ein Lager mit 2.000 Einheiten Kapazität, wird in der Regel nicht die doppelten Kosten verursachen, sondern aufgrund einer Größendegression darunterliegen. Stellt man bei der Analyse der Ergebnisse fest, dass die Lagerkapazität voll ausgenutzt wurde, kann es sinnvoll sein, die Berechnung mit einer höheren Lagerkapazität nochmals auszuführen, wenn die Kosten entsprechend angepasst wurden. Natürlich sollten nur denkbare Kapazitäten und Kostenkonstellationen geprüft werden. Bei der Implementierung selbst erfolgt keine Ermittlung der optimalen Kapazitäten der verschiedenen Prozessphasen der Verwertung oder des Lagers. Diese sind durch den Bediener einzugeben.

Auch sollte die Skalierung der unterschiedlichen Prozesszustände aufeinander schätzungsweise angepasst werden. So ist die Aussagekraft der Ergebnisse geringer, wenn beispielsweise die Kapazitäten des Recyclings niedriger gesetzt würden, als die der Aufarbeitung.

5 Modellanwendung und Bewertung

Die Schaffung und Entwicklung von nachhaltigen Wertschöpfungsketten ist heute bereits Bestandteil der strategischen Planung und Entwicklung vieler Unternehmen. Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft ist dabei die Schaffung von Produkt- oder Ressourcenkreisläufen ein entscheidender Bestandteil.

Die Schaffung und Etablierung von entsprechenden Verwertungskreisläufen, kann in einigen Fällen auch dazu führen, dass Unternehmen zusätzlichen ökonomischen Wert generieren können. In diesen Fällen bietet sich auch die Möglichkeit an neue Geschäftsmodelle zu etablieren oder bestehende Geschäftsmodelle zu erweitern.

Selbst wenn die Etablierung von entsprechenden Verwertungskreisläufen nicht per se ökonomische Erfolge bringt, können weitere Anreize zur Entwicklung bestehen. Denkbar sind hier beispielsweise veränderte Kundenerwartungen an Produkte und Dienstleistungen von Unternehmen. Auch gesetzliche Neuerungen, die Unternehmen den stärkeren Einbezug von Verwertungen der Produkte auferlegen.

In diesem Kapitel werden nun ausgewählte Beispiele zur Bewertung vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf der Veranschaulichung der Flexibilität des Bewertungsansatzes zu zeigen. Die Grundlage der Dateneingaben beruht dabei auf Literaturdaten, die im Falle des Beispiels der Traktionsbatterie teilweise durch Expertenaussagen verifiziert werden konnten. Bei den Expertenaussagen handelt es nicht um die Verifikation der absoluten Werte der Dateneingabe, sondern um ein ähnliches relatives Verhältnis. Zur Beschreibung der Use Cases werden zunächst einige relevante Markt- und Produktdaten vorgestellt. Die Auswahl des Dateninputs erfolgt unter der Bewertung zusammen mit der Darstellung der Ergebnisse.

5.1 Anwendung für Konsumgüter

5.1.1 Auswahl des Use Cases Waschmaschine

Waschmaschinen stellen in Deutschland ein typisches Gebrauchsgut dar und ca. 95 % aller Haushalte in Deutschland besitzen (mindestens) eine Waschmaschine (Destatis 2019).

Basierend auf Informationen vom jährlichen Umsatz an Waschmaschinen (ca. 1,1 Mrd € in 2018 und 3,25 Mio. Maschinen in 2018), lässt sich herleiten, dass ein rechnerischer Durchschnittspreis einer Waschmaschine 335 Euro im Jahr 2018 betrug. Der Markt zeigt ein geringes Wachstum, kann insgesamt aber als gesättigt angesehen werden (Wewer und Guidat 2019). Starke Trends oder tiefgreifende Innovationen, die die Nachfrage oder auch finanziellen Merkmale wie Kosten und Erlöse der Hersteller beeinflussen werden eher nicht erwartet. Der relativ konstante Markt, spricht dafür, dass eine Aufarbeitung grundsätzlich mög-

lich ist, da heute prognostizierte Kosten und Erlöse in der Zukunft als weniger risikobehaftet zu bewerten sind. Jedoch besteht innerhalb Deutschlands zunächst keine unbefriedigte Nachfrage.

Es gibt unterschiedliche Marktsegmente mit variierenden Verbraucherpreisen, von denen die Erlöse für neue Produkte abgeleitet werden können. Entsprechend dem Vorgehen von Prakash et al. (2016) wurden Preisdaten diverser Internetplattformen[1] als Referenz zur Bewertung herangezogen. Demnach stellt der rechnerische Durchschnittspreis von 335€ eher das untere Preissegment dar, wohingegen eine mittelpreisige Waschmaschinen bei ca. 600 € liegt und ca. 1.000 € für eine hochpreisige Waschmaschine zu zahlen sind. Das niedrige Preissegment scheint keinen Spielraum für mögliche aufbereitete Produkte zu lassen, da diese wohl kaum unter dem Neupreis angeboten werden könnten. Bei den hochpreisigen Maschinen ist dies eher vorstellbar. Die Produktionskosten pro Maschine liegen dabei unter den Verkaufspreisen, bei denen nicht nur eine Gewinnmarge des Herstellers abzuziehen ist, sondern auch die Gewinnmarge des Groß-/bzw. Einzelhändlers.

Das Ende der Nutzungszeit einer Waschmaschine muss nicht dem technischen Ende der Lebensdauer entsprechen. Im Jahr 2012/2013 erfolgten 76 % der Neukäufe von Waschmaschinen, da die alte Waschmaschine kaputt war und weitere 11 % aufgrund einer fehlerhaften, aber noch funktionsfähigen Waschmaschine (Prakash et al. 2016). Demnach wurden 13 % der Waschmaschinen ausgetauscht, obwohl sie noch funktionierten. Dies kann darauf hindeuten, dass einerseits gebrauchte Waschmaschinen zurückgeführt werden könnten, die noch funktionsfähig sind und ggf. direkt weiterverwendet werden können. Andererseits könnten sich diese auch für eine Aufarbeitung eignen, da davon auszugehen ist, dass ggf. nur wenige Komponenten ausgetauscht werden müssen.

Ein Hinweis, darauf, dass Konsumenten bereit sein könnten, auch aufgearbeitete Produkte mit entsprechender Garantie zu erwerben, zeigt sich darin, dass die Aspekte Langlebigkeit, gutes- Preis Leistungsverhältnis und Qualität für ca. 80 % der Konsumenten beim Kauf einer neuen Waschmaschine besonders wichtig sind, wohingegen ein niedriger Preis und innovative Technik nur für 30 % besonders wichtig sind und wahrnehmbares Design sogar nur für 15 % als sehr wichtig gelten (Statista 2016).

Informationen zur technischen Lebenszeit werden von Herstellern wenig publiziert und schwanken in der Literatur. Ein hochpreisiger Hersteller[2] gibt an, dass die technische Lebensdauer der eigenen Maschinen auf ca. 10.000 Betriebsstunden ausgelegt ist. Bei 5 Waschladungen pro Woche entspricht dies ca. 20 Jahre Lebenszeit. Folgt man den Angaben von Bressanelli et al. (2017) und 160 Waschladungen pro Jahr würde dies einer Lebensdauer von 30 Jahren entsprechen. Rüdenauer und Greißhammer (2004) sprechen von sehr verschiedenen Annahmen in der Literatur, die meist zwischen 10 und 15 Jahren liegen, wobei die technische Lebensdauer von der Anzahl der Waschzyklen abhängt, die wiederum von der Anzahl der Personen im Haushalt geprägt ist.

---

[1] Vgl. www.idealo.de und www.billiger.de und www.check24.de am 28.04.2020
[2] Vgl. https://m.miele.com/de/com/langlebigkeit-und-zuverlaessigkeit-3016.htm# am 28.04.2020

Einer im Jahr 2016 durchgeführten Umfrage zu Folge, kommen über 60 % der Waschmaschinen in Deutschland von fünf führenden Marken, die jeweils Marktanteile zwischen 11-15 % haben (Statista 2016). Diese Hersteller sind eher dem mittel- und hochpreisigen Segment entsprechend den oben getroffenen Informationen zuzuordnen. Mit einem Marktanteil von 10 % wäre aber mit einem Absatz von 325.000 Stück pro Jahr (bezogen auf alle Modelle) für einen Hersteller zu rechnen. Es ist davon auszugehen, dass die Absatzmenge nicht über alle Modelle des Produktportfolios gleichmäßig aufzuteilen ist.

Die Hersteller der Waschmaschinen sind entsprechend des ElektroG bereits heute in Deutschland dafür verantwortlich die finanziellen Kosten der Entsorgung der Waschmaschinen von privaten Haushalten zu tragen. Dies beinhaltet sowohl die Sammlungs- als auch die Verwertungskosten, wobei entsprechend des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, eine möglichst hochwertige Verwertung zu wählen ist. Somit sollten sie bereits Konzepte zur Kreislaufschließung bei der Entwicklung der Produkte einplanen.

Trotz gesetzlicher Vorgaben ist das Erreichen der gesetzlichen Sammelquote gemäß des ElektroG ein großes Problem der Kreislaufwirtschaft in Deutschland. Da die Sammelquote bei Haushaltsgroßgeräten relativ niedrig ist, sie aber durch ihr hohes Gewicht einen großen Anteil auf die Gesamtquote haben, ist eine Steigerung der Quote ein wichtiges Ziel (Löhle et al. 2018), auch um die ab 2019 geltende Vorgabe von 65 % Sammelquote lt. ElektroG erreichen zu können.

Nach Schmiedel et al. (2018) entsorgen Verbraucher bisher den größten Anteil der Waschmaschinen im Wertstoffhof, haben aber in Zukunft vor zunehmend Tauschservices bei Lieferung eines Neuproduktes in Anspruch zu nehmen.

Es wird bewertet in wie fern eine Aufarbeitung von hochpreisigen Waschmaschinen eine Alternative zum Recycling darstellen kann und ob diese einen ökonomischen Mehrwert für den Hersteller bieten kann. Nach Wewer und Guidat (2019) gibt es baugleiche Komponenten in unterschiedlichen Modellen, die durch den Konsumenten nicht wahrgenommen werden (wie etwa Pumpen), die also gut bei einem Remanufacturing instandgesetzt oder ausgetauscht werden können. Auch ist nur bedingt zu erwarten, dass Konsumenten bei sichtbaren Komponenten (z. B. der Trommel) auf ein Design gleiches Bauteil Wert legen. Im Gegensatz zu einem direkten Reuse kann davon ausgegangen werden, dass Waschmaschinen während der Aufbereitung auch hygienisch gereinigt werden können, ein für viele Konsumenten vermutlich entscheidender Faktor.

Da der Markt an sich in Deutschland gesättigt ist und durch das Remanufacturing eine mögliche Kannibalisierung der eigenen Produkte vermieden werden soll, müssen neue Kunden für die aufgearbeiteten Produkte gefunden werden. Innerhalb Deutschlands oder dem europäischen Markt, können dies für Hersteller hochpreisiger Waschmaschinen z. B. Kunden sein, die bisher preisgünstige Neuware kaufen. Wenn die aufbereiteten Waschmaschinen mit einer weitreichenden Garantie ausgestattet sind, könnten sie ein Konkurrenzprodukt darstellen, mit einem guten Preis-Leistungsverhältnis.

Darüber hinaus könnte auch international ein Interesse an den aufbereiteten Produkten bestehen. So gibt es Länder in denen der Second-Hand Markt auch Potential für aufbereitete Waschmaschinen bietet (z. B. Vietnam (Yamasue et al. 2017)), allerdings sind in Deutschland führende Marken dort bisher wenig vertreten. Oftmals werden jedoch andere Modelle (z. B. Toploader) bevorzugt oder es bestehen andere Ansprüche an Strom-und Wasseranschlüsse. Dies könnte zu einem Zusatzaufwand in der Aufarbeitung führen, falls andere Standards erfüllt werden müssen oder die Aufbereitung für andere Märkte unattraktiv machen.

5.1.2 Bewertung des Use Cases Waschmaschine

Bei der Berechnung sollen zwei mögliche Nutzungsphasen von Waschmaschinen modelliert werden. Neben dem Recycling, das gesetzlich in Deutschland verankert ist, soll auch eine Aufarbeitung mitbewertet werden, die nur stattfindet, wenn sie als ökonomisch vorteilhaft gilt.

Es wird von einer Sammelquote von 30 % ausgegangen, die damit unter den gesetzlichen Zielwerten liegt. Die Nutzungsdauer der Waschmaschinen wird mit einem Minimum von 1 Jahren und einem max. von 12 modelliert. Für eine neue Waschmaschine wird ein Erlös von 1.000€ zum Zeitpunkt der Bewertung angesetzt, für eine aufbereitete Waschmaschine werden 400€ angenommen. Außerdem wird analysiert, welchen Einfluss der Anteil der Waschmaschinen hat, die zur Aufarbeitung geeignet sind. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass 20 % der gesammelten Waschmaschinen aufbereitet werden können. 80 % eignen sich nicht zur Aufarbeitung und müssen dementsprechend einem fachgerechten Recycling zugeführt werden.

Da die Entwicklungskosten nicht entscheidungsrelevant bei der Berechnung sind, solange sie identisch und über die gleiche Zeit verteilt bei der Berechnung der verschiedenen Szenarien anfallen, werden sie ausgeschlossen. In etwa 45 % der Herstellkosten fallen als Fixkosten an. Es wird von einer Gewinnmarge von 15 % angesetzt, die die Differenz zwischen Herstellkosten und Verkaufserlös von Neuprodukten abdeckt. Die variablen Aufarbeitungskosten seien ca. 20 % der variablen Kosten der Neuproduktion (vgl. Asif et al. (2016)). Es wird angenommen, dass keine Kosten für den Hersteller anfallen, während die Waschmaschinen in der Nutzung sind. Die Nachfrage nach aufbereiteten Produkten des modellierten

Waschmaschinenmodells sinkt über den Zeitverlauf. Die erwartete zeitliche Anpassung über die Zeit wird mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 5 % bewertet. Die Transportkosten für die Rückführung seien 50 € pro Waschmaschine (zum Zeitpunkt der Bewertung). Recyclingkosten werden ebenfalls mit 50 € bezogen auf den Zeitpunkt der Bewertung angenommen, wobei diese eine variablen Charakter haben. Sie können z. B. den Transport zum Recyclingunternehmen repräsentieren.

Der berechnete Gewinn, auf Basis des Barwerts, kann durch die Rücknahme und Durchführung der Verwertungen nicht gesteigert werden. Dies liegt daran, dass die Recyclingerlöse nicht ausreichen, um das Recycling und die entstehenden Transport- bzw. Sammlungskosten zu decken.

Bei einer Sammlungsquote von 30 % findet keine Aufarbeitung statt und alle Waschmaschinen werden recycelt.

In Tabelle 2 werden Ergebnisse einiger Abwandlungen in Bezug auf die Dateneingabe dargestellt. Die Eintragungen Nachfrage „nicht limitierend" bedeutet, dass angenommen wird, es gibt stets eine Nachfrage für aufbereitete Waschmaschinen. Ist sie „limitierend" wird ein zeitlicher Verlauf der Nachfrage nach aufbereiteten Produkten angenommen, der sich an er Nachfrage nach neuen Waschmaschinen mit einer leichten, zeitlichen, Verzögerung orientiert. Die Nachfrage nach aufbereiteten Waschmaschinen steigt somit zunächst, nimmt dann aber wieder ab. So kann es sein, dass nur noch eine geringe Nachfrage nach aufbereiteten Waschmaschinen besteht, wenn ein Großteil der gebrauchten Maschinen zurückkommt. In der Tabelle werden die Ergebnisse normiert, zum grau hinterlegten Fall dargestellt. Es zeigt sich, dass eine Sammlungsquote von 100 % nicht zum höchsten rechnerischen optimalen Gewinn führt. Zwar steigen die Erlöse bei einer höheren Sammlungsquote, aber die steigenden Transportkosten, durch die Anzahl der Rückläufer, haben einen entscheidenden Einfluss. Hier kann es nötig sein durch eine Optimierung die beste Sammelquote zu berechnen (nicht dargestellt).

Tabelle 2 Normierte Ergebnisse der Anwendung am Beispiel von Waschmaschinen

Nachfrage	Sammlungsquote in %	Normierte Aufarbeitunsquote	Normierter kalkulatorischer Gewinn	Normierter kalkulatorischer Erlös	Normierter kalkulatorischer Recycling Erlös	Normierte Transportkosten
nicht limitierend	**30**	**20**	**100**	**100**	**100**	**100**
nicht limitierend	100	20	92,2	111	341	394
limitierend	100	20	91,8	108	339	372
limitierend	100	40	93	112	342	399
limitierend	30	40	101	102	88	106

Ein Problem der Aufbereitung der Produkte zeigt sich darin, dass die Nachfrage auch nach aufbereiteten Produkten höher ist, wenn die Produkte noch nicht allzu lange auf dem Markt sind. Bei längerfristig nutzbaren Konsumgütern sind zu diesem Zeitpunkt jedoch meist noch nicht genug Produkte zum Remanufacturing vorhanden. Diese kommen erst als Rückläufer, wenn keine Nachfrage mehr besteht.

Anders könnte es bei der Wiederverwendung einzelner Baugleicher Komponenten sein. Jedoch bringen diese deutlich geringere Erlöse als ein gesamtes Produkt. Gleichzeitig müssen die Produkte unter Umständen dennoch komplett demontiert werden, um einzelne Bauteile wiederzugewinnen und aufzuarbeiten und auch müssten die Produkte als Ganzes gesammelt werden. Dieser Aufwand wird durch die Erlöse, die durch die Wiederverwendung einzelner Komponenten entstehen, nicht gedeckt.

Da bisher ein Großteil der Waschmaschinen über Wertstoffhöfe entsorgt wird, müssten, wenn eine Aufarbeitung durch den Hersteller angestrebt wird, Konzepte zur Sicherung der Rückläufer geschaffen werden. Sollte sich die Verwertung und Aufarbeitung von Konsumgütern im industriellen Maßstab als profitabel erweisen, kann die Sammelquote und damit die Anzahl an zurückgeführten Produkten ein Problem darstellen. Da Kunden bei Haushaltsgroßgeräten oftmals Ersatzkäufe tätigen, könnten Hersteller Anreize durch Take Back Aktionen oder Rabatt beim Austausch gezielt nutzen. Dabei besteht jedoch ein Anreiz gerade für die Rückgabe noch relativ neuer Produkte größere Rabatte und Boni an die Kunden weiterzugeben. Dies widerspricht jedoch unter Umständen dem grundsätzlichen Bestreben die Produkte so lange wie möglich in der Nutzung zu halten. Gleichzeitig ist es oft nicht der Hersteller direkt, der die Produkte verkauft, sondern Zwischenhändler. Diese müssten ebenfalls Anreize bekommen, die Sammlung durchzuführen und die Produkte ggf. an den Hersteller oder das verwertende Unternehmen weiterleiten.

5.2 Anwendung in der automobile Wertschöpfungskette

Die aufgestellte Bewertungsmethode wurde in Zusammenarbeit mit Projektpartner aus der Automobilindustrie erarbeitet. Entsprechend soll sich der zweite Use Case mit einer aktuellen Fragestellung beschäftigen, die Bestandteil der Überlegungen vieler Fahrzeughersteller ist.

Die Fahrzeugtechnik und damit auch die Fahrzeugindustrie befinden sich zurzeit in einem Umbruch. Dominierten bisher Verbrennungsmotoren die Antriebstechnik der Fahrzeuge, werden diese zunehmen durch elektrische Antriebskonzepte ersetzt. Innerhalb eines Jahres (Jan 2019-Jan 2020) ist der Anteil von zugelassenen reinen Elektrofahrzeugen in Deutschland von 0,2 % (83.175) auf 0,3 % (136.617) angestiegen, was eine Änderung von 64,3 % darstellt (Kraftfahrt Bundesamt 2020). Bis 2040 wird angenommen, dass 57 % der Kraftfahrzeugverkäufe elektrische Fahrzeuge sein werden (auch Hybridantriebe) und dass global der Anteil von elektrischen Fahrzeugen auf 30 % ansteigen wird (Bloomberg 2019).

Ein Ziel der Elektromobilität ist es Emissionen, die durch den Verkehrssektor ausgestoßen werden, zu mindern. Um jedoch eine nachhaltige Wertschöpfung zu gewährleisten, sollten auch eine Verwertung und die Schaffung von Kreislaufsystemen für Elektrofahrzeuge oder ihre Hauptkomponenten möglich sein. Den im Fahrzeug verbauten Traktionsbatterien kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Einerseits bilden sie das Bauteil mit dem höchsten Materialwert und Herstellungswert, sowie hohen Entwicklungskosten und sie haben auch nach ihrem Ende der Nutzung im Fahrzeug einen hohen Wert, da sie zu diesem Zeitpunkt noch 70-80 % an Speicherkapazität haben. Andererseits ist die Produktion der Speicherzellen sehr rohstoff- und energieintensiv. Nur wenn es gelingt die Rohstoffe zu recyceln und die Batterien langfristig zu nutzen, kann die Elektromobilität auch eine nachhaltige Wertschöpfung sein.

Im Rahmen dieses Kapitels bezeichnen wir mit dem Begriff Batterie oder Traktionsbatterie das komplette Batteriesystem oder auch Batteriepack, das sowohl den Block mit den Batteriezellen bzw. -modulen enthält, als auch weitere Bauteile wie das Batterie-Managementsystem (Köhler 2013).

Verschiedene Verwertungsoptionen bestehen, um sowohl eine möglichst lange Kreislaufführung der Batterien als Produkte zu ermöglichen. Zunächst gibt es das stoffliche Recycling, für das verschiedene Recyclingtechnologien bestehen, die jedoch bisher nur teilweise industriell ausgereift sind (Martens und Goldmann 2016; Elwert et al. 2018). Je nach Recyclingtechnologie werden unterschiedliche Ressourcen zurückgewonnen, die wiederum ggf. entweder dem Rohstoffmarkt zugeführt werden oder aber technisch auch direkt zur Herstellung neuer Batterien eingesetzt werden könnten. Es ist zu erwarten, dass die Recyclingtechnologie in den nächsten Jahren noch weitere technische Fortschritte macht.

Eine höherwertige Verwertung, die die Nutzungszeit verlängert, könnten die gebrauchten Traktionsbatterien finden, wenn sie nach ihrem Einsatz im Fahrzeug zunächst eine Weiterverwendung in Form eines Second Lifes erfahren, dabei verlassen sie meist die automobile Wertschöpfungskette (Bräuer und Stieger 2019). Diskutiert werde vor allem sekundäre Speicheranwendungen, in denen die Batterien weiterhin als Energiespeicher z. B. zum Ausgleich bei der Zwischenspeicherung von erneuerbarer Energie eingesetzt werden (Fischaber et al. 2016). Für diese Anwendung gibt es auch erste Beispiele, in deren Realisierung verschiedene Automobilhersteller involviert sind.[3]

Ein solcher quasi direkter Reuse kann die Nutzungsdauer der Batterien deutlich verlängern (Wieland et al. 2017). Dabei können weitere Erlöse generiert werden, wobei geringe Kosten zur Bereitstellung erwartet werden. Allerdings sind dennoch einige Anforderungen zu erfüllen, z. B. entsprechende Prüfungen der Traktionsbatterien oder kleinere technische Anpassungen.

[3] Eine kurze Liste mit einigen beispielhaften Projekten findet sich im Anhang 7.3.

Andererseits gibt es Konzepte, die eine größere Umwidmung der Batterien vorsehen, in denen sie zwar weiterhin ihre Funktion als Speicher von Energie behalten, aber ggf. eine physische Veränderung erfahren. Dies kann z. B. die Umwidmung und Nutzung der Gesamtbatterie zum Antrieb von Flurförderfahrzeugen in der Logistik sein (Bräuer und Stieger 2019).

Auch eine Aufarbeitung in Form eines Remanufacturing kann eine zielführende Verwertungsform sein, bei der ebenfalls die Nutzungsdauer der Batterien verlängert wird, jedoch die Batterie je nach Aufarbeitungsziel in der automobilen Wertschöpfungskette bleibt, denn aufbereitete Batterien können als Original Ersatzteile angeboten werden. Dies ermöglich sogenannte Aftermarket Sales. Dabei kann theoretisch sowohl die gesamte Traktionsbatterie wie sie zurückgeführt wurde (z. B. als Batteriepack) aufgearbeitet werden oder auch nur einzelne Bestandteile (z. B. Module). Welche Art von Aufarbeitung ausgeführt wird, kann u.a. auch durch das Produktdesign bestimmt werden, welches Auswirkungen darauf hat, in wie fern eine Aufarbeitung möglich ist. Neben einer Aufarbeitung für die Nutzung als Ersatzteil, könnten auch aufgearbeitete Batterien für Second-Life Anwendungen verwendet werden. Dies erscheint dann angebracht, wenn keine Nachfrage nach Ersatzteilen besteht.

Bereits heute sind die meisten Fahrzeughersteller aktiv in der Aufarbeitung gebrauchter Komponenten für Verbrennungsfahrzeuge tätig. Dabei werden insbesondere Bauteile die Funktionen im Bereich des Aggregats erfüllen, aufgearbeitet. Jedoch ist zu erwarten, dass für die Aufarbeitung von Traktionsbatterien andere technische Ansprüche an die Aufarbeitungsschritte gestellt werden. Dies können z. B. geforderte Qualifizierungen des Personals zur Arbeit mit Hochvoltbaukomponenten sein oder die Frage in wieweit ein Rückbau und Ersatz kaputter Batterieteile überhaupt möglich sind. Diese Fragestellungen sind allerdings nicht Bestandteil des Projektes und des Bewertungsansatzes und werden als technisch als auch rechtlich umsetzbar vorausgesetzt.

5.2.1 Beschreibung des Use Cases Traktionsbatterie

Wir bewerten in wie fern es ökonomisch vorteilhaft ist, für einen Fahrzeughersteller, der Elektrofahrzeuge auf den Markt bringt eine Aufarbeitung von Batterien (dies bezieht sich auf Batteriepacks) zu investieren, wenn Konzepte einer Weiterverwendung als Alternative bestehen, sowie das Recycling. Die Absatzzahlen sind nicht repräsentativ für den Absatz eines einzelnen Fahrzeugprojektes.

Im Basisszenario wird ein Berechnungszeitraum von 40 Jahren gewählt, ausgehend von 2019, wobei ein Produktionsstart erst nach vier Jahren Entwicklung stattfindet. Die Produktion der Neuteile erstreckt sich im Anschluss über zehn Jahre. Nach diesen 14 Jahren können zusätzliche Erlöse nur noch über verwertete Produkte erfolgen. Die Nutzungszeit erstreckt sich über einen Zeitraum von einem bis zu fünfzehn Jahren, wobei 8 Jahre Nutzungszeit am häufigsten ist. Die Qualitäten der zurückgeführten Batterien seien wie folgt:

- 10 % können in eine direkte Wiederverwendung gehen
- 40 % können aufgearbeitet werden und dann entweder als Original aufgearbeitetes Ersatzteil verkauft werden oder für eine andere Zweitnutzung verwendet werden
- 50 % der Batterien können nur noch dem Recycling zugeführt werden.

Die Kosten für die Aufarbeitung von Traktionsbatterien wurden aus Literaturdaten hergeleitet und stellen Schätzungen dar (Foster et al. 2014; Standridge und Hasan 2015; Kamper et al. 2019). Sie orientieren sich dabei am Aufwand, der zur Aufarbeitung notwendig ist. Da bisher keine industrielle Aufarbeitung von Traktionsbatterien stattfindet, stellen sie die besten verfügbaren Informationen dar. Es wird weiterhin angenommen, dass aufbereitete Traktionsbatterien auch für die Anwendungszwecke einer Weiterverwendung geeignet sind, somit ist die Nachfrage nach ihnen deutlich höher, als lediglich für den After-Sales Markt als Ersatzteil. Diese Wahl wurde getroffen, da derzeitig noch nicht prognostizierbar ist, wie hoch die Nachfrage nach aufgearbeiteten Batterien als Ersatzteil sein wird. Insgesamt erfolgt die Bewertung des Cases mit Werten, deren Relation entscheidend ist und wie sich diese über den Bewertungshorizont verändern.

5.2.2 Bewertung des Use Cases Traktionsbatterie

Abbildung 10 zeigt wie sich die Anzahl der Batterien über den Berechnungshorizont bei variierenden Sammlungsraten verhält. Deutlich sichtbar wird der Unterschied erst, nachdem ein Großteil der Batterien sich dem Ende der ersten Nutzungsphase nähern. Dabei wird der Absatz der Batterien nicht für ein einzelnes Fahrzeugmodell abgebildet, sondern angenommen, dass eine Reihe von (gleichzeitigen) Fahrzeugprojekten umgesetzt werden, die die gleiche Batterietechnik verwenden.

Zwar gibt es auch bereits Batterien, die schon zurückgeführt werden, während noch neue Batterien in den Markt gelangen, allerdings ist die Anzahl so gering, dass der Unterschied in der Grafik nicht sichtbar wird.

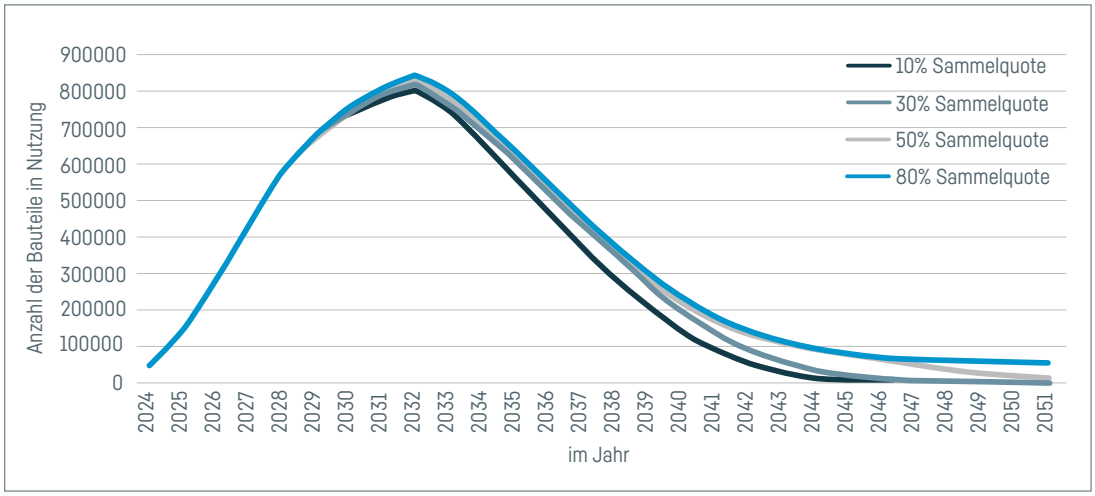


Abbildung 10 Zeitlicher Verlauf der Batterien in Nutzung bei unterschiedlichen Rückführungsquoten

Im Falle des Basisszenario zeigt sich, das ab einer Sammelquote von 17 % eine Aufarbeitung sowie eine Wiederverwendung ökonomisch vorteilhaft wird. Bei 17 % ist die Etablierung eines entsprechenden Aufbereitungsprozesses ab 2034 sinnvoll, bei einer Sammlungsrate von 50 % ab 2029. Ist die Sammlungsrate geringer als 17 % ist das Recycling aller Batterien ökonomischer als in eine Aufarbeitung zu etablieren.

In einer Abwandlung des Basisszenarios wird untersucht, ob ähnliche Ergebnisse erzielt werden, wenn die Qualität der Rückläufer schlechter ist. Im Szenario „schlechtere Qualität", sei weiterhin der gleiche Anteil an Rückläufern für den Reuse geeignet, aber nur ein Geringerer für die Aufarbeitung, so dass 70 % der Batterien nach der ersten Nutzung im Fahrzeug dem Recycling zugeführt werden müssen. Wie entsprechend der Modellogik zu erwarten ist, befinden sich langfristig weniger Batterien in der Nutzung (Abbildung 11), da ein größerer Anteil nach der ersten Nutzung dem Recycling zuzuführen ist. Wie aus der Tabelle 3 entnommen werden kann, reicht die Sammlungsquote von 17 % in diesem Fall nicht mehr aus, um die Aufarbeitung als ökonomisch vorteilhaft im Vergleich zum Recycling zu betreiben. Erst bei einer Sammlungsquote von 28 % werden genug Batterien zurückgeführt, damit eine Aufbereitung ökonomisch vorteilhaft ist. Die Sammelquoten 20%, 28% und 30% wurden normiert zur Sammelquote von 17% dargestellt

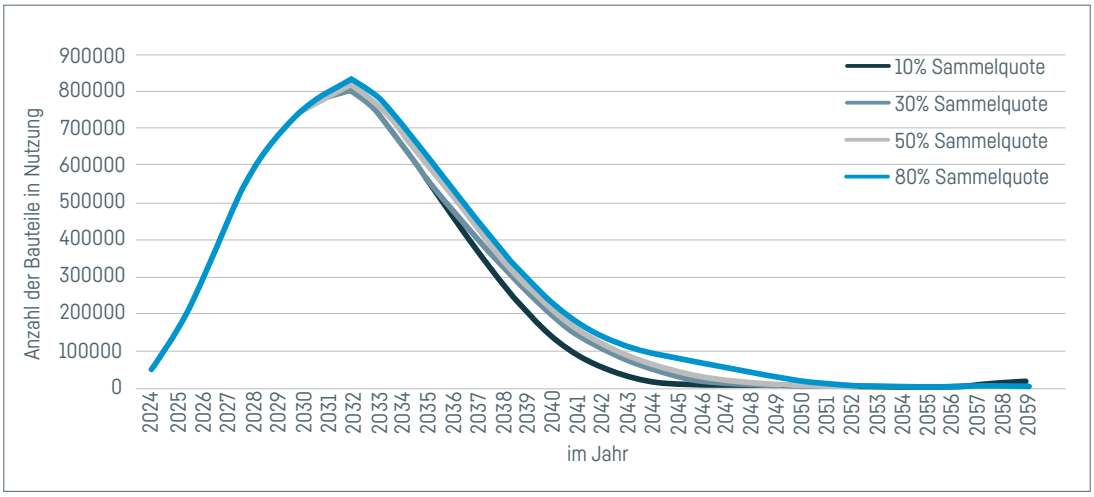


Abbildung 11 Bauteile in der Nutzung beim Szenario "schlechtere Qualität"

Tabelle 3 Normierte Ergebnisse der Anwendung am Beispiel von Traktionsbatterien

Sammlungs-quote in %	Qualität der Rückläufer in % (Wiederver-wendung/ Aufarbei-tung/ Recycling)	Normierter rechneri-scher Gewinn	Normierter rechneri-scher Erlös	Remanufac-turing	Reuse	Normierte Transport-kosten
17	**10/20/70**	**100**	**100**	**nein**	**nein**	**100**
20	10/20/70	102	101	nein	Ja, 2037	120
28	10/20/70	108	106	Ja, ab 2036	Ja, ab 2036	180
30	10/20/70	111	12	Ja, ab 2035	Ja, ab 2035	194

Es ist jedoch zu hinterfragen, ob entsprechend hohe Sammelquoten in der automobilen Wertschöpfungskette erreichbar sind. Bei konventionellen Fahrzeugen wird ein Großteil der Fahrzeuge nach ihrer endgültigen Abmeldung nicht in Deutschland verwertet, sondern ins Ausland exportiert, so das nur ca. 15 %-20 % der Fahrzeuge auch als Altautos in Deutschland verbleiben.[4] Neben einem Austausch von Batteriepacks in Werkstätten, während das Fahrzeug noch in Nutzung verbleibt, wird ein Großteil der Altbatterien von Fahrzeugen stammen, die ebenfalls verwertet werden. Damit scheint selbst eine Sammlungsquote von 17 % in unserem Szenario als optimistisch, wenn der Export gebrauchter Elektrofahrzeuge ähnlich wahrscheinlich ist, wie gebrauchter konventioneller Fahrzeuge.

Im Gegensatz zum Beispiel der Waschmaschine, ist davon auszugehen, dass nicht nur der Markt für Traktionsbatterien in den nächsten Jahrzehnten kontinuierlich und zunächst exponentiell in Deutschland wächst (Natkunarajah et al. 2015; Hoyer 2015; Fischaber et al. 2016) und sich sowohl mögliche Erlöse als auch Kostenstrukturen dadurch ändern werden. Sinkende Kosten in der Herstellung durch Skalen- und Lerneffekte beeinflussen auch die möglichen Einnahmen für aufbereitete Produkte, denn diese orientieren sich an denen von Neuprodukten. Somit ist das Aufstellen einer Prognose, wie hoch Kosten und Erlöse von Verwertungswegen in der Zukunft sein werden, während der Phase der Produktentwicklung nur sehr eingeschränkt und unter der Annahme von viel Unsicherheit möglich.

[4] https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeug-verwertung-fahrzeugverbleib#verbleib-von-endgultig-ausser-betrieb-gesetzten-fahrzeugen (Stand. 1.05.2020)

Dies führt dazu, dass ein Fortschreiben bzw. eine Anpassung zukünftiger Erlöse und Kosten auf Basis eines kalkulatorischen Zinssatzes vermutlich nicht die beste Modellierungsmethode zur Abschätzung der ökonomischen Auswirkungen sind. Zwar kann dieser bei den Berechnungen variiert werden, aber er kann z. B. nicht modellieren, dass Kosten in Zukunft durch Skaleneffekte auch sinken können[5]. Das Modell lässt sich auch für diese Zwecke verwenden, jedoch steigt die Komplexität und Fehleranfälligkeit bei der Umsetzung in einer Microsoft Excel®.

Zu diesem Zweck wurde das Modell in die Software CPLEX Studio IDE übertragen. So können die Sammlungsquoten, die erzielbaren Erlöse aber auch Kosten individuell für jede Generation und Verwendungsart der Produkte angepasst werden, ohne große Fehlerrisiken zu eröffnen. Dies ist insbesondere bei Bewertungen von möglichen Leasing-oder Mietmodellen sinnvoll. Zur Bewertung solcher Konzepte fehlt es jedoch an Informationen zur Dateneingabe.

---

[5] Im Rahmen der Vorstellungen sollte eine Berechnung mit möglichst wenig Eingaben erfolgen können.

6 Diskussion und Ausblick

Für die Berechnung der besten Verwertungsoption sind eine Vielzahl von Angaben über Kosten- und Erlösströme über den kompletten Lebenszyklus des zu betrachtenden Produkts nötig. Da sich der Produktlebenszyklus häufig über mehrere Jahre erstreckt, ist außerdem eine Vorausschau über die Entwicklung einiger Parameter erforderlich. Diese Informationen mögen für den Bediener eventuell nur schwer zu beschaffen oder einzuschätzen sein.

Um zumindest die Eingabe bei der Vielzahl an Kostendaten zu vereinfachen, könnte die Entwicklung einer grafischen Nutzeroberfläche weiterhelfen. Dadurch wird die Eingabe zumindest insofern einfacher, als dass nur Eingabefelder angezeigt werden oder gewisse Informationen über eine Liste ausgewählt werden können. Jedoch ist es notwendig, dass ein Verwender dabei auch widergespiegelt bekommt, welche Auswirkungen bestimmte Auswahlkriterien haben können.

Ein zweiter wichtiger Punkt ist die Tatsache, dass der in MS Excel zur Verfügung stehende Solver bezüglich Umfang und Komplexität des Optimierungsproblems schnell an seine Grenzen stößt. Bei komplizierteren Fragestellungen, die das Thema Reuse, Remanufacturing oder Recycling durchaus bietet, ist das Modell in reiner Excel-Umgebung bezüglich Anzahl der Variablen und Nebenbedingungen eingeschränkt. Für tiefergehende Fragestellung wäre es notwendig, eine andere, für Optimierungen besser ausgelegte Umgebung, zu finden. Der Wunsch das Modell in Excel zu implementieren kam aus der Industrie um zu gewährleisten, dass das Modell möglichst einfach zu verwenden ist ohne dass teure Lizenzen gekauft werden müssen. Allerdings würde sich als Tool auch z.B. Python anbieten, da dies ebenfalls kostenlos verfügbar und damit leicht zugänglich wäre. Hier könnte dann eine multikriterielle Optimierung entwickelt werden, die die Verwertungsoptionen aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet.

6.1 Weiterentwicklung und Limitationen

6.1.1 Limitationen des Modells

Ziel war es eine einfach zu bedienende Berechnung zu ermöglichen wie die ökonomischen Auswirkungen von Verwertungsoptionen beurteilt und verglichen werden können. Dabei sollte der Ansatz so generisch wie möglich sein und gleichzeitig nur wenige Informationen zur Bedienung benötigen. Ein entsprechend einfaches Modell wurde entwickelt und in der Microsoft Excel® Umgebung implementiert. Da nur wenige Daten in die Berechnung einfließen, lassen sich auch nur grundlegende Ergebnisse aus der Berechnung ableiten. Die Belastbarkeit dieser Ergebnisse ist im Einzelfall zu prüfen, da sie stark von der Qualität der Inputdaten abhängen. Entsprechend liegt der zeitliche Aufwand in der Auswahl und Zusammenstellung der benötigten Daten.

Erweiterungen des formalen Modells sind möglich und können dazu führen, dass die Ergebnisse besser beurteilt werden. Jedoch müssen hierfür einerseits mehr Daten eingegeben werden, die entsprechend vorher zu sammeln und aufzubereiten sind. Andererseits ist vom Einzelfall der Bewertung offen, in wie weit überhaupt zusätzliche Daten verfügbar sind. Um Ergebnisse nicht misszuinterpretieren, sollte ein genaues Verständnis des formalen Modells vorliegen.

Einige Weiterentwicklungen wurden bereits bei der Bewertung der Traktionsbatterien und der Berechnung mit Hilfe einer anderen Software vorgenommen. Dies umfasst z. B. die Möglichkeit die Sammelquoten individuell für einzelne Generationen und Arten der Nutzung anzupassen. So kann z.B. modelliert werden, dass Batterien, die eine Weiterverwendung in Energiespeichern gefunden haben, mit einer großen Wahrscheinlichkeit wieder gesammelt werden können, während Batterien in Form von Ersatzteilen eventuell nicht zurückgeführt werden.

Um auch Geschäftsmodelle mit Leasing -und Mietoptionen so zu modellieren, dass einzelne Preisgestaltungsoptionen dargestellt werden können, müssen auch für die Produkte während der Nutzung weitere Aufgliederungen erfolgen. Dies lässt sich gut im erweiterten Modell umsetzen. Um jedoch ein entsprechendes Kundenverhalten abbilden zu können, ist ein gutes Wissen über das Konsumentenverhalten und ihre Preissensitivität notwendig. Dieses Wissen geht über die Möglichkeiten des Modells hinaus.

6.1.2 Limitationen eines generischen Ansatzes

Bevor eine Bewertung durchgeführt wird, ist abzuwägen in wie weit Markt-/Technologie-/ und finanzielle Entwicklungen abgeschätzt werden können. Je länger die erwartete Nutzungsdauer eines Produktes ist, umso schlechter können benötigte Daten zur Bewertung adäquat hergeleitet werden, denn die Verlagerung in die Zukunft ist entsprechend länger. Die nicht bewertbaren Faktoren sind vielfältig. So kann nur bedingt bestimmt werden, welche und ob neue Technologien auf den Markt kommen werden. Diese könnten einerseits die Verwertungsprozesse selbst verändern, so kann die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung zu effizienteren und damit kostengünstigeren Verwertungsprozessen führen. Andererseits könnten weiterentwickelte Recyclingtechnologien Auswirkung haben, die das Recycling positiver beeinflussen würde, also andere Verwertungsoptionen.

Gerade auf großen, internationalen Märkten wie im Bereich der Automobilwirtschaft können neue Marktteilnehmer und Wettbewerber auftreten, die vor der Produkteinführung noch nicht bekannt sind, aber z. B. die Nachfrage nach aufbereiteten Produkten beeinflussen können.

Ein sehr wichtiger Faktor sind geänderte gesetzliche Rahmenbedingungen, die gerade Verfahren zur Zweitnutzung des Produktes beeinflussen können, wenn diese unter Umständen in der Zukunft zum Zeitpunkt der Bewertung nicht bekannte Grenzwerte einhalten müssen.

Selbst wenn es erlaubt ist Produkte wiederzuverwenden und dies ökonomisch vorteilhaft ist, sollte im Einzelfall abgewogen werden, ob dies auch ökologisch vorteilhaft ist. Gelingt es z. B. Neuprodukte deutlich energieeffizienter zu nutzen als aufbereitete Produkte, stellt sich die Frage der ökologischen Vorteilhaftigkeit einer Weiternutzung bzw. Aufarbeitung. So fällt bei Waschmaschinen derzeitig ein Großteil der ökologischen Auswirkungen während der Nutzung an. In wie weit eine Aufarbeitung ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist kann nur im Einzelfall abgeschätzt werden (Bressanelli et al. 2017).

Bei Bewertungen aus Sicht von Unternehmen, deren wertschöpfende Tätigkeiten und ökonomischen Gewinne bisher in der Herstellung und dem Vertrieb neuer Produkte liegt, ist kritisch zu hinterfragen, ob sich der Einstieg in neue Geschäftsbereiche lohnt. Auch wenn es ein ökonomischer Vorteil ist, wie im Falle der Traktionsbatterie gezeigt wurde, schließt dies nicht aus, dass andere Akteure und Wettbewerber die Verwertungen nicht kostengünstiger oder effizienter ausführen könnten, da sie z. B. größere Skaleneffekte erzielen könnten. So wäre genau zu überprüfen, ob nicht durch strategische Partnerschaften bessere Ergebnisse erzielt werden könnten.

Eine Bewertung dieser Faktoren ist mit dem vorliegenden Bewertungsansatz nicht möglich und bedarf jeweiliger Einzelprüfungen. Die Zusammenstellung und Bewertung aller Faktoren kann nur bei einer umfassenden Kenntnis erfolgen und sollte insbesondere die Bewertung von Unsicherheiten ermöglichen. Eine Fokussierung von Kosten- und Erlösströme ist nicht zu empfehlen, vielmehr bedarf es anderer Ansätze zum Beispiel aus dem Feld der multikriteriellen Entscheidungsfindung, in denen die Bewertung mit dem entwickelten Ansatz ein Faktor von vielen ist.

6.1.3 Ausweitung der Bewertungsdimensionen

Bisher wurde nur die ökonomische Bewertung betrachtet. Um allerdings das Thema Nachhaltigkeit vollumfänglich betrachten und bewerten zu können, reicht die alleinige Sicht auf die ökonomische Seite nicht aus. Um das Thema Nachhaltigkeit möglichst vollständig zu betrachten, sollten auch die ökologischen und die sozialen Komponenten berücksichtigt werden (siehe Abbildung 10).

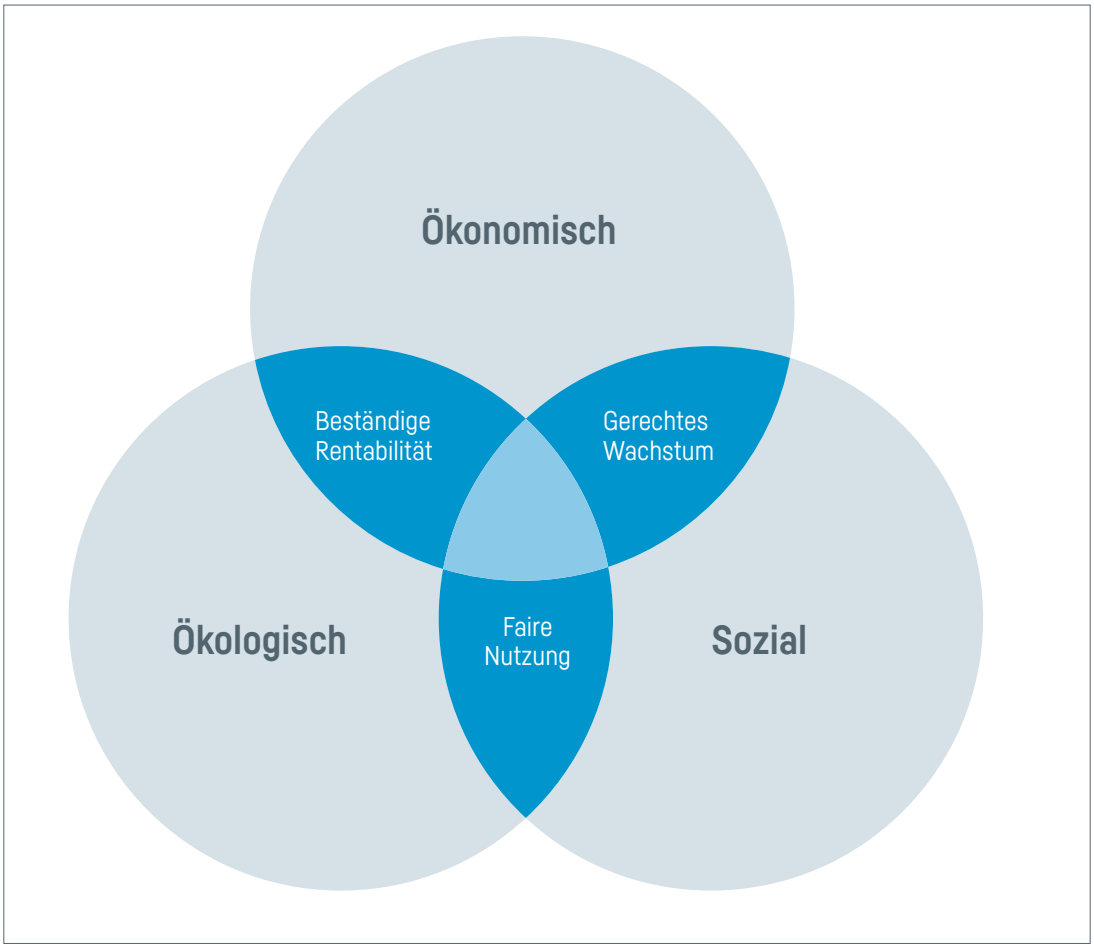


Abbildung 12 Die drei Säulen der Nachhaltigkeit (Ludwikowski 2010)

Im entwickelten Bewertungsansatz gibt es bereits die Möglichkeit ökologische Auswirkungen wie etwa CO_2 Auswirkungen zu monetarisieren und somit in die Bewertung einzubeziehen Da der Lebenszyklus des zu betrachtenden Produkts bereits durch die Kostenströme abgedeckt ist, bietet es sich an anhand dieses Lebenszyklus eine Ökobilanz zu erstellen und berechnen. In einer Ökobilanz werden die Umweltauswirkungen eines Produktes über dessen kompletten Lebenszyklus oder über ausgewählte Stationen seines Lebenszyklus berechnet. Da in diesem Projekt im Speziellen der zweite (bzw. x-fache) Lebenszyklus betrachtet wird, stellt sich natürlich die Frage, wie Emissionen über mehrere Lebenszyklen angerechnet und berücksichtigt werden. Hierzu gibt es innerhalb der Methode Life Cycle Assessment noch keine standardisierte Lösung. Auch deswegen soll im Rahmen der Weiterentwicklung im ökologischen Bereich besonders auf die Allokation von Emissionen von mehreren Lebenszyklen eingegangen werden. Darüber hinaus werden insbesondere beim Thema Batterien von elektrischen Fahrzeugen lange Lebenszyklen betrachtet. Um hier die Umweltauswirkungen über die Lebenszeit so akkurat wie möglich darstellen zu können, empfiehlt es sich eine dynamische Ökobilanz zu rechnen, d.h. Veränderungen über den Zeitverlauf zu berücksichtigen. In einer Standard Ökobilanz wird angenommen, dass alle berechneten Emissionen und Umweltauswirkungen an einem Punkt x in die Umwelt treten,

allerdings ist es in der Realität so, dass es einen großen Unterschied macht, in welcher Höhe, an welchem Zeitpunkt und in welchem Zeitraum diese Emissionen und Umweltauswirkungen auftreten. Um diesem Verhalten Rechnung zu tragen, wird die Ökobilanz in der Weiterentwicklung des Projekts dynamisch gerechnet. Außerdem sollen Trade-Offs z. B. zwischen CO_2-Emissionen und Gewinnen berechnet werden.

Eine weitere wichtige Säule im Bereich Nachhaltigkeit bildet der soziale und gesellschaftliche Aspekt, der zwar generell schwieriger zu erheben ist als ökonomische und ökologische Aspekte, aber dennoch nicht vernachlässigt werden sollte. Hier können anhand einer Sozialbilanz (sLCA) die sozialen Auswirkungen und Nutzen berechnet werden. Dafür werden mit Hilfe von sozialen Indikatoren sozioökonomische Effekte von Produkten oder kompletten Unternehmen entlang der (gesamten) Wertschöpfungskette berechnet und bewertet. Dadurch lassen sich die Ökobilanz und die ökologischen Indikatoren innerhalb der abgesteckten Systemgrenzen einfach erweitern und ergänzen. Soziale Aspekte können sehr vielfältig sein und sich je nach Region und Interessensgruppen deutlich unterscheiden, zusätzlich können sich die verschiedenen Einflüsse deutlich schneller bemerkbar machen als bei ökologischen und ökonomischen Betrachtungen, was die Anwendung der sLCA erschwert. Hinzukommt außerdem die bisher kaum entwickelte Datenlage. Nichtdestotrotz sollte man die sozialen Aspekte bei einer Nachhaltigkeitsbetrachtung nicht außer Acht lassen. Innerhalb dieser Säule werden im Projekt auch die Auswirkungen von neuen Geschäfts- und Nutzungskonzepten analysiert. Bei mehreren Lebenszyklen von Produkten und den möglichen neuen Verwertungsoptionen wie Reuse ergeben sich neue Nutzungskonzepte, weg von „Besitzen“ hinzu „Mieten“ bzw. „Besitzen auf Zeit“. Die Effekte davon auf die Gesellschaft sollen hier in einer sLCA betrachtet werden.

Zusätzlich zur ökonomischen und ökologischen Säule kann noch die technische Seite betrachtet werden. Hier geht es vor allem um die Frage nach dem „Design for Remanufacturing“, also wie müssen Bauteile wie Batterien oder Waschmaschinen designed und gebaut sein, damit eine Weiterverwendung mit nur wenig Aufwand in Betracht gezogen werden kann. Zum Beispiel stellt sich hier auch die Frage, wie Klebeverbindungen vermieden und ersetzt werden können, damit eine Demontage zur Reinigung oder zum Austausch von Teilen möglichst schnell und (kosten-)effizient möglich ist.

7 Anhang

7.1 Beschreibung der Eingabefelder

Allgemeine Hinweise

Das Tool berechnet auf Basis eines linearen Optimierungsmodells eine möglichst ökonomische (ggf. gleichzeitig ökologische) Kreislaufführung von Bauteilen oder Produkten. Es obliegt der bedienenden Person des Tools sicherzustellen, dass die Datenbasis möglich konsistent ist. Dies bedeutet u.a., dass alle entstehenden Kostenströme (aber auch Erlösströme) entlang des Lebenszyklus erfasst werden. Gleichzeitig sollten diese auf einer möglichst identischen Datenbasis erhoben werden.

Für alle Zellen mit orangener Füllung sind Eingaben zu tätigen. Für graue Felder hingegen müssen keine Angaben gemacht werden. Je nach Auswahl einzelner Einstellungen kann die Anzahl der orangenen und grauen Felder im Tool variieren. Erscheinen während der Eingabe rote Felder, so liegt ein Fehler bei der Eingabe vor. Über das Aufrufen der Hilfeoption (Fragezeichen), können weitere Informationen zur Eingabe nachgelesen werden.

Wie viele Jahre sollen betrachtet werden?

Dieses Feld gibt den Berechnungszeitraum des Modells an. Eine Eingabe von „50“ führt zu einer Berechnung über 50 Jahre. Der Berechnungszeitraum sollte an die bewerteten Komponenten/Produkte angepasst werden. Er berücksichtigt die Phase ab Start der Produktentwicklung. Je länger die erwartete Lebensdauer eines Produktes/einer Komponente, umso länger sollte der Berechnungszeitraum gewählt werden, um genug Zeit für die Kreislaufführung zu haben.

Geöffnete Standorte müssen geöffnet bleiben

Die Antwortmöglichkeiten sind „Ja“ oder „Nein“. Die Auswahl dieser Angaben hat Auswirkungen auf die Verwertungsoptionen bei denen Fixkosten angegeben werden. Wenn alle Standorte geöffnet bleiben müssen, fallen die Fixkosten auch in den Jahren (Zeitperioden) an, in denen keine Verwertung stattfindet, sobald das erste Mal eine Verwertung stattgefunden hat.

Durchführbare Optionen

Die Auswahl der durchführbaren Optionen bestimmt die Gestaltung der Kreislaufführung. Die Berechnung geht davon aus, dass ein Recycling für alle Produkte möglich ist (deswegen ist diese Verwertung nicht optional). Neben dem Recycling kann noch die Option „Aufarbeitung“ berücksichtigt werden. Diese beinhaltet eine Aufarbeitung („Remanufacturing“) der rückgeführten Komponenten auf einen Status wie neu.

Die Option „Weiterverwendung“ soll eine alternative Nutzung der Bauteile für einen anderen Verwendungszweck wiederspiegeln. Dabei kommt es jedoch nicht zu größeren physischen Änderung der Bauteile.

Unter durchführbare Optionen findet sich ebenfalls die Möglichkeit festzulegen, ob gewonnene Sekundär-Rohstoffe gelagert werden dürfen. Es ist zu empfehlen, dass hier die Option „Nein“ gewählt wird. Dann wird bei der Berechnung davon ausgegangen, dass der Erlös eines recycelten Teiles auch in der Zeitpunktanfällt, in der die Kosten für das Recycling anfallen. Wird „Ja“ ausgewählt, können die Erlöse auch erst in einem späteren Zeitpunkt erfolgen, für die Lagerungszeit werden dann Lagerkosten berücksichtigt.

Letztlich gibt es noch die Möglichkeiten näher zu spezifizieren über wie viele Jahre die Entwicklungskosten anfallen und wie diese prozentual über die Jahre verteilt werden. Dauert der Entwicklungsprozess 3 Jahre, so ist hier 3 auszuwählen. Es ist anzumerken, dass erst mit der Produktion begonnen werden kann, wenn die Entwicklungsphase abgeschlossen ist (keine Überlagerung). Dies wird dadurch ersichtlich, dass Produktionszahlen/Verkaufszahlen bei drei Entwicklungsjahren erst ab Jahr 4 einzutragen sind.

Kosten pro Prozessschritt des Lebenszyklus

In Kosten pro Prozessschritt müssen sowohl die variablen als auch fixen Kosten eingetragen werden. Die fixen Kosten entsprechen den Kosten, die anfallen sobald ein Bauteil (Produkt) sich in diesem Prozessschritt des Lebenszyklus befindet. Die variablen Kosten fallen pro Bauteil an und entsprechen in etwa den Einzelkosten.

Die Demontagekosten beziehen sich auf die Kosten, die vor oder mit der Sammlung der Altprodukte einhergehen (ohne den Transport zur Verwertung). Es sind somit z. B. Personalkosten der Demontagebetriebe zur Entnahme das Batteriepacks-/Moduls etc. entstehen.

Produktions-und Nachfragezahlen

Für jedes Jahr im Betrachtungszeitraum sind Angaben über die Produktions- bzw. Nachfragemengen anzugeben. Wird für Jahre keine Nachfrage nach Bauteilen angenommen, so sind die entsprechenden Felder mit 0 zu füllen. Die Anzahl der Spalten mit Eintragungen richtet sich dabei nach der unter „Wie viele Jahre sollen betrachtet werden“ eingegeben Zahl.

Im Modell wird davon ausgegangen, dass die Nachfrage nach Neuteilen (Produktions-und Verkaufszahlen) immer erfüllt wird, so dass weder Überproduktion, noch Fehlmengen entstehen.

Für die Nachfrageangaben „aufgearbeitete Produkte“ und „Wiederverwendung“ hingegen handelt es sich um Angaben bzgl. erwarteter Nachfrage bzw. max. Absatzmenge auf dem Markt. Bei einer Berechnung können diese erfüllt werden, müssen es aber nicht (Hinweis: Die Nachfrage muss nicht erfüllt werden, kann aber auf keinen Fall überschritten werden). Bsp: Bei der Berechnung kann als Ergebnis herauskommen, dass keine Aufarbeitung gewählt wird, obwohl diese physisch möglich wäre, da die Kosten für den erwarteten Erlös unter den gegebenen Rahmenbedingungen unzureichend sind.

Für das Recycling gibt es keine Abfrage nach der Nachfragemenge, da davon ausgegangen wird, dass es immer eine Nachfrage nach zurückgewonnenen Ressourcen geben wird.

Wie viele Nutzungsphasen sollen max. möglich sein? Nutzungsdauer abhängig vom Lebenszyklus? Minimal/Häufigste/Maximal

Hier wird angegeben wie viele Nutzungsphasen im Modell möglich sein sollen. Wird „1“ ausgewählt, so wird das Bauteil einmal genutzt und dann eingesammelt. Da eine Aufarbeitung und Wiederverwendung nicht ökonomisch sein kann, wenn es keine zweite Nutzungsphase gibt, würden im Anschluss alle Teile recycelt werden oder Lager angelegt, für die entsprechende Lagerhaltungskosten anfallen.

Maximal können 4 Nutzungsphasen bei der Berechnung berücksichtigt werden, wobei die Auswahl von 2 oder maximal 3 Nutzungsphasen für viele Bauteile realitätsnäher erscheinen.

Weiterhin gibt es die Möglichkeit anzugeben, ob für jede Nutzungsphase die gleiche Dauer erwartet wird oder sich diese über die Nutzungsphasen hinweg ändert. Die Nutzungsdauer wird in Jahren angegeben. Mit Angaben zur minimaler, häufigster und maximaler Dauer wird es für die Berechnung ermöglicht die Rückführmengen zu bestimmen.

Anteil der gesammelten Teile am eine der Nutzungsphase

Durch die Angabe einer Zahl zwischen 0 und 1 wird angegeben wie viel Prozent der in Nutzung befindlichen Teile demontiert (gesammelt) werden und der Verwertung zur Verfügung stehen. Diese Angabe entspricht somit der Sammelquote.

Qualität der zurückgeführten Teile

Zurückgeführte Teile können unterschiedliche Qualitäten haben, die die Auswahl der möglichen Verwertungsoptionen beeinflusst. Bei der Berechnung werden drei Qualitäten unterschieden. Es wird angenommen, dass die Qualität für eine direkte Wiederverwendung am höchsten sein muss, gefolgt von der notwendigen Qualität für die Aufarbeitung. Recycling ist auch für die Bauteile mit sehr geringer Qualität möglich. Jedes Bauteil entspricht immer eindeutig einer der Qualitätsstufen.

Für die Dateneingabe wird abgefragt wie viel Prozent der zurückgeführten Bauteile welcher Qualitätsstufe entspricht (die Summe muss 1 ergeben, d.h. 100 % der Bauteile lassen sich einer Qualität zuordnen).

Da zu erwarten ist, dass sich das Verhältnis der Qualitäten der Bauteile über die Nutzungsphasen hinweg verändert, müssen bzw. können diese für jede Nutzungsphase einzeln angegeben werden.

Wichtiger Hinweis: Dabei wird nur berücksichtigt, ob es sich um die erste, zweite etc. Nutzungsphase handelt, nicht aber, ob das Teil zuvor aufgearbeitet wurde oder wiederverwendet.

Die Aufteilung der Bauteile ist auch deshalb notwendig, da das Modell unterschiedliche Modellrahmen auf Basis dieser Angaben annehmen kann. Hierzu gibt es bereits am Anfang des Arbeitsblattes die Abfrage, ob zurückgeführte Bauteile immer entsprechend ihrer höchsten Qualitätsstufe verwertet werden müssen oder Substitutionen möglich sind, d. h. auch Bauteile der Qualitätsstufe Aufarbeitung z. B. dem Recycling zugeführt werden können.

Kalkulatorischer Zinssatz/Inflation

Mit diesem angegebenen Zinssatz werden die Kostenangaben über die Jahre hinweg angepasst. Die erwarteten Erlöse hingegen werden mit dem Inflationssatz erweitert.

Maximale Kapazitäten pro Jahr

Die Angaben zu den maximalen Kapazitäten geben an, wie viele Teile bzw. Produkte in einem Jahr eine bestimmte Prozessstufe durchlaufen dürfen. Diese können einerseits als max. Produktionskapazitäten aufgefasst werden. Die Angaben bzgl. der Lagermengen bestimmen andererseits wie viele Produkte max. gleichzeitig gelagert werden dürfen. Diese können bestimmten Einschränkungen unterliegen. Einerseits, falls physische Lagerbeschränkungen bestehen. Andererseits, damit Produkte auch im Modell im Kreis geführt werden müssen und z. B. keine dauerhafte Lagerung der Produkte möglich sind. Dies könnte vorkommen, falls alle Verwertungsoptionen höhere Kosten als Erlöse erzielen, wohingegen eine Lagerung mit geringeren Kosten verbunden wäre.

7.2 Grafische Oberflächen des Berechnungstools

Entweder ist Arbeitsblatt 1. a. oder 1. b auszufüllen. --> 1.a entspricht industriebezogener Kostenstruktur (Produktergebnisrechnung)
Alle Kosten sind entweder pro Bauteil (als variable Kosten einzugeben) oder als Kosten pro Jahr (Fixkosten).

Wie viele Jahre sollen betrachtet werden?	20	?
Geöffnete Standorte müssen geöffnet bleiben	Ja	?
Erlös pro...		?
Neuteil	10000	
weiterverwendetes Teil (REU)	8000	
aufbereitertem Teil (REM)		
recyceltem Teil	6000	
Durchführbare Optionen		
Wiederverwendung (REU) ?	Ja	
Aufbereitung (REM)?	Nein	
Lagerung recycelter Rohstoffe zulässig?	Ja	
Höhe der gesamten Entwicklungskosten	10000	?
Über wie viel Jahre verteilt fallen die Entwicklungskosten an?	2	

Verteilung der Entwicklungskosten je Jahr	Jahr 1	Jahr 2
	0,6	0,4

Welche Bedingungen sollen für die Berechnung in Bezug auf die Verwertungsoptionen gelten?

- ○ Zurückgeführte Bauteile oder Produkte müssen immer der höchst möglichen Verwertungsform folgen. Die Priorisierung der Verwertungsoptionen ist: Reuse, Remanufacturing, Recycling.
- ● Zurückgeführte Bauteile oder Produkte, deren Qualität für Reuse oder Remanufacturing ausreichend sind, dürfen auch recycelt werden.
- ○ Zurückgeführte Bauteile der Qualität Reuse, dürfen sowohl dem Remanufacturing als auch dem Recycling zugeführt werden. Bauteile oder Produkte deren Qualität für Remanufacturing ausreichend sind, dürfen auch dem Recycling zugeführt werden.

Fragen zur Kostenstruktur?	Entwicklung	Produktion	Nutzung	Demontage	Lagerung (demontierte Teile)	Wiederverwendung (nur Qualitätsprüfung	Aufarbeitung	Recycling	Lager für wiederverwendbare Teile	Lager aufgearbeiteter Teile	Lager recycelte Rohstoffe	Transportkosten	Kosten pro Komponente (variable Kosten) = entspricht "EK"	Kosten pro Jahr (Fixkosten) entspricht "GK"
Einzelkosten Basis													Ja	Nein
Fertigungsmaterialkosten													Ja	Nein
Änderungskosten													Nein	Ja
Fertigungspersonalkosten													Ja	Nein
Gewährleistungskosten													Nein	Ja
Sonderzeinzelkosten (Vertrieb)													Ja	Nein
Sonstige EK													Ja	Nein
Einzelkosten Lines													Ja	Nein
Einzelkosten Sonderausstattung													Ja	Nein
Entwicklungskosten													Ja	Nein
Investitionen													Ja	Nein
Investitionen Beschaffung													Ja	Nein
Investitionen Produktion													Ja	Nein
Anlaufkosten													Ja	Nein
Fertigungsgemeinkosten													Ja	Nein
Indirekte Personalkosten													Ja	Nein
Sachgemeinkosten													Ja	Nein
Investgemeinkosten													Nein	Ja
Abschreibungen													Ja	Nein
Verwaltung und Vertriebskosten													Ja	Nein
Verwaltungskosten													Ja	Nein
Kommunikation													Ja	Nein
Vertriebsgemeinkosten													Ja	Nein
Planungsgemeinkosten													Ja	Nein
Einkaufsgemeinkosten													Ja	Nein
Risikovorsorge													Ja	Nein
Summe der variablen Kosten		0	0	0	0	0		0	0		0	0		
Summe der Fixkosten		0	0	0	0	0		0	0		0	0		

Abbildung 13 Eingabemaske der Kosten-/Erlös und Nachfragedaten basierend auf der Kalkulationsstruktur eines Unternehmens inkl. Nachfrage und Rückführungsstruktur

Produktions- und Nachfragezahlen ?

Jahre	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5	Jahr 6	Jahr 7	Jahr 8	Jahr 9	Jahr 10	Jahr 11	Jahr 12	Jahr 13	Jahr 14
Produktions-/Verkaufszahlen														
Nachfrage nach aufbereitete Teilen														
Nachfrage nach weiterverwendeten Teilen														

Wie viele Nutzungsphasen sollen maximal möglich sein?	2
Nutzungsdauer lebenszyklusabhängig?	Ja ?
Nutzungsdauer in Jahren	1. Nutzungsphase
Minimal	1
Häufigste	2
Maximal	20

	2. Nutzungsphase
Minimal	1
Häufigstens	2
Maximal	3

Anteil der gesammelten Teile am Ende einer Nutzungsphase ("1" entspricht 100 %)	0,8 ?
Qualität der zurückgeführten Teile	?
Zurückgeführt nach	Zurückgeführt nach der 1. Nutzungsphase
Wiederverwendung (Reuse)	0,7
Aufbereitung (Remanufacturing)	
Recycling	0,3

Nach der letzten Nutzungsphase werden alle Produkte und Bauteile gesammelt recycelt.

Kalkulatorischer Zinssatz in Bezug auf Kosten	0,10 ?
Kalkulatorische Inflation für zukünftige Erlöse	0,02

Maximale Kapazitäten der Bauteile pro Jahr ?

Produktion	10000
Demontage Bauteile	10000
Lagerung demontierte Bauteile	100000
Prüfung Wiederverwendung	100000
Aufarbeitung	
Recycling	100000
Lager aufgearbeitete Teile	
Lager Teile zur Wiederverwendung	10000

Berechnung starten

Abbildung 13 Eingabemaske der Kosten-/Erlös und Nachfragedaten basierend auf der Kalkulationsstruktur eines Unternehmens inkl. Nachfrage und Rückführungsstruktur

Entweder 1. a. oder 1. b --> 1.b entspricht Modellbezogener Kostenstruktur
Alle Kosten sind entweder pro Bauteil (als variable Kosten einzugeben) oder als Kosten pro Jahr (Fixkosten).

Wie viele Jahre sollen betrachtet werden?	20
Geöffnete Standorte müssen geöffnet bleiben	Ja

Soll neben der ökonomischen auch eine ökologische Optimierung durchgeführt werden?	Ja
Preis je CO2-Äquivalant in €	10

Erlös pro ...

Neuteil	
weiterverwertendes Teil (REU)	
aufbereitetem Teil (REM)	
recyceltem Teil	

Durchführbare Optionen

Weiterverwendung für andere Anwendung (REU)?	Nein
Aufarbeitung (REM)?	Nein
Lagerung recycelter Rohstoffe zulässig?	Nein

Höhe der gesamten Entwicklungskosten	0
Über wie viel Jahre verteilt fallen die Entwicklungskosten an?	1
Verteilung der Entwicklungskosten je Jahr	Jahr 1
	1

Welche Bedingungen sollen für die Berechnung in Bezug auf die Verwertungsoptionen gelten?

- ● Zurückgeführte Bauteile oder Produkte müssen immer der höchst möglichen Verwertungsform folgen. Die Priorisierung der Verwertungsoptionen ist: Reuse, Remanufacturing, Recycling.
- ○ Zurückgeführte Bauteile oder Produkte, deren Qualität für Reuse oder Remanufacturing ausreichend sind, dürfen auch recycelt werden.
- ○ Zurückgeführte Bauteile der Qualität Reuse, dürfen sowohl dem Remanufacturing als auch dem Recycling zugeführt werden. Bauteile oder Produkte deren Qualität für Remanufacturing ausreichend sind, dürfen auch dem Recycling zugeführt werden.

Kosten pro Prozesschritt des Lebenszyklus	Fix pro Jahr	Pro Komponente	CO2-Äquivalente pro Jahr	CO2-Äquivalente pro Bauteil
Entwicklung				
Produktion				
Nutzung				
Demontage				
Lagerung (demontierte Teile)				
Weiterverwendung				
Aufarbeitung				
Recycling				
Lager für wiederverwendbare Teile				
Lagerung aufgearbeiteter Teile				
Lager recycelte Rohstoffe				
Transportkosten				

Produktions- und Nachfragezahlen

Jahre	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4	Jahr 5	Jahr 6	Jahr 7	Jahr 8	Jahr 9	Jahr 10	Jahr 11	Jahr 12	Jahr 13	Jahr 14
Produktions-/Verkaufszahlen														
Nachfrage aufbereitete Teile (REM)														
Nachfrage Reuse (REU)														

Abbildung 14 Eingabemasken der Kosten-/Erlöse und Nachfragedaten der modellbezogenen Kostenstruktur

Wie viele Nutzungsphasen sollen maximal möglich sein?	4
Nutzungsdauer lebenszyklusabhängig?	Ja
Nutzungsdauer in Jahren	1. Nutzungsphase
Minimal	1
Häufigste	2
Maximal	3
Anteil der gesammelten Teile am Ende einer Nutzungsphase ("1" entspricht 100 %)	0,3
Qualität der zurückgeführten Teile	

	2. Nutzungsphase
Minimal	1
Häufigstens	6
Maximal	8

	3. Nutzungsphase
Minimal	1
Häufigstens	4
Maximal	6

	4. Nutzungsphase
Minimal	1
Häufigstens	2
Maximal	4

	Zurückgeführt nach der 1. Nutzungsphase	Zurückgeführt nach der 2. Nutzungsphase	
Wiederverwendung (Reuse)			
Aufbereitung (Remanufacturing)			
Recycling	1	1	1

Nach der letzten Nutzungsphase werden alle Produkte und Bauteile gesammelt recycelt.

Kalkulatorischer Zinssatz	0,10
Inflation	0,03
Maximale Kapazitäten (Bauteile) pro Jahr	
Produktion	1000000
Demontage Bauteile	1000000
Lagerung demontierte Bauteile	1000000
Prüfung Wiederverwendung	
Aufarbeitung	
Recycling	1000000
Lager aufgearbeitete Teile	
Lager Teile zur Wiederverwendung	

Berechnung starten

Abbildung 15 Eingabedaten der Rückführungsstruktur für modellbezogene Kostenstruktur

7.3 SWOT-Analyse

STÄRKEN

- Senkung von Kosten und zusätzlicher Gewinn durch Erlöse
- Verlängerung des Produktlebens und zweites Leben in stationären Anwendungen möglich
- Schonung von Ressourcen durch die Verwendung in einem zweiten/x-ten Lebenszyklus
- Batterien sind noch „zu gut“ zum Wegwerfen nach dem ersten Lebenszyklus

SCHWÄCHEN

- Keine Aussagen über den Zustand nach der Rückkehr aus dem ersten Lebenszyklus möglich
- Keine Aussagen über die verbleibende Lebensdauer in einem weiteren Lebenszyklus möglich
- Bisher viele verschiedene Batteriezusammensetzungen, die eine Demontage erschweren

CHANCEN

- Es entstehen neue Geschäftsmodelle und Märkte
- Bei einem Verzögern des Recycling können in der Zwischenzeit neue Recyclingmethoden entwickelt werden
- Entwicklung von einheitlichen Batteriezusammensetzungen für eine bessere und einfache Demontage

RISIKEN

- Es entwickelt sich keine Nachfrage nach aufbereiteten Produkten
- Es entwickelt sich eine zu hohe Nachfrage nach den aufbereiteten Produkten
- Nötige Aufbereitung übersteigt den Wert des Produkts
- Unklare rechtliche Lage und Auflagen

7.4 Übersicht über installierte und geplante Energiespeicher durch Automobilhersteller

OEM	Details	Quelle
Renault	„Advanced Battery Storage"-Programme, Ziel bis 2020 eine Leistung von mindestens 60 MWh installieren	(Laurent 2019; Groupe Renault 07.05.2020)
BMW	Speicherfarm: Seit 2017 bis zu 700 ausgediente i3-Batterien in einem Kraftwerk gebündelt (wobei bisher noch nicht genügend Rückläufer vorhanden sind und auch neue Batterien genutzt werden)	(BMW Group 2017a, 2017b)
Daimler	Werk für Bau von Energiepseicher über Tochterfirma Accumotive.	(JvM 2020; Mercedes-Benz Energy: Energy storage systems 2020; Accumotive 2020)
Tesla	Powerball Energiespeicher für Zuhause und Entwicklung Megapacks	(Tesla 2020)
Audi	Batteriespeicher auf Berliner EUREF-Campus Der Speicher mit einer Kapazität von 1,9 MWh nutzt gebrauchte Lithium-Ionen-Batterien aus Entwicklungsfahrzeugen	(AUDI AG 2019)
Nissan	xStorage in Zusammenarbeit mit Eaton. Speicher nutzt recycelte Batterien des Nissan Leaf	(Nissan Deutschland 2016)

8 Literaturverzeichnis

APRA (2012): Remanufacturing Terminology. Remanufacturing Term Guide. Hg. v. Automotive Parts Remanufacturers Association.

APRA; CLEPA; MERA; ANRAP; FIRM; CPRA (2016): A Definition of Remanufacturing. Remanufacturing Associations Agree on International Industry Definition. Hg. v. Automotive Parts Remanufacturers Association. Frankfurt.

AUDI AG (2019): Audi eröffnet Batteriespeicher auf Berliner EUREF-Campus.

Bloomberg (2019): Electric Vehicle Outlook 2019. Hg. v. Bloomberg. Online verfügbar unter https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/, zuletzt aktualisiert am 2019, zuletzt geprüft am 01.04.2020.

BMW Group (2017a): BMW Group geht neue Wege für eine nachhaltigere Batteriezellen-Lieferkette. Mehr Transparenz und konkrete Maßnahmen beim Abbau von Kobalt geplant. Online verfügbar unter https://www.press.bmwgroup.com/austria/article/detail/T0275626DE/bmw-group-geht-neue-wege-fuer-eine-nachhaltigere-batteriezellen-lieferkette-mehr-transparenz-und-konkrete-massnahmen-beim-abbau-von-kobalt-geplant, zuletzt geprüft am 07.05.2020.

BMW Group (2017b): BMW Speicherfarm Leipzig – Infofilm. Online verfügbar unter https://www.press.bmwgroup.com/austria/video/detail/PF0005681/BMW-Speicherfarm-Leipzig-Infofilm, zuletzt geprüft am 07.05.2020.

Bräuer, Sebastian; Stieger, Alexander (2019): End-of-Life-Strategien für Traktionsbatterien. In: Jörg Becker, Daniel Beverungen, Martin Winter und Sebastian Menne (Hg.): Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien, Bd. 8. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 21–123.

Bressanelli, Gianmarco; Perona, Marco; Saccani, Nicola (2017): Reshaping the Washing Machine Industry through Circular Economy and Product-Service System Business Models. In: Procedia CIRP 64, S. 43–48. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.065.

Broehl-Kerner, Horst; Elander, Maria; Koch, Martin; Vendramin, Claudio (2012): Second Life. Wiederverwendung gebrauchter Elektround Elektronikgeräte. Hg. v. Umweltbundesamt. Deassu-Roßlau (ISSN 862-4804). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4338.pdf, zuletzt geprüft am 01.04.2020.

Bullinger, Hans-Jörg; Spath, Dieter; Warnecke, Hans-Jürgen; Westkämper, Engelbert (2009): Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung. 3. neubearb. Aufl. s.l.: Springer-Verlag (VDI-Buch).

Busse von Colbe, Walther; Laßmann, Gert; Witte, Frank (2015): Investitionstheorie und Investitionsrechnung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Dehoust, G.; Küppers, P.; Bringezu, S.; Wilts, H. (2010): Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Erstellung eines bundesweiten Abfallvermeidungsprogramms. Hg. v. Umweltbundesamt. Öko-Institut e.V. und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4043.pdf, zuletzt geprüft am 30.04.2020.

Destatis (2019): Ausstattung privater Haushalte mit Haushaltsgeräten und Sportgerät (LWR). Hg. v. Destatis. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/liste-haushaltsgeraete-d.html#fussnote-1-115474, zuletzt geprüft am 15.04.2020.

Deutsche Umwelthilfe (2014): Informationen zum umweltfreundlichen deutschen Mehrwegsystem. Hintergrundpapier. Unter Mitarbeit von Thomas Fischer. Hg. v. Deutsche Umwelthilfe. Online verfügbar unter https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/Mehrweg_Hintergrundpapier_2015.pdf, zuletzt geprüft am 14.04.2020.

ElektroG: Elektro- und Elektronikgerätegesetz Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten, vom 20.10.2015, 2129–2159, zuletzt geprüft am 14.04.2020.

Ellen MacArthur Foundation (2012): Circular Economy Report – The Circular Economy – Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition.

Elwert, Tobias; Römer, Felix; Schneider, Kirstin; Hua, Qingsong; Buchert, Matthias (2018): Recycling of Batteries from Electric Vehicles. In: Gianfranco Pistoia und Boryann Liaw (Hg.): Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles, Bd. 1. Cham: Springer International Publishing (Green Energy and Technology), S. 289–321.

Fennemann, Verena; Hohaus, Christian; Jan-Philip Kopka (2017): Circular Economy Logistics: Für eine Kreislaufwirtschaft 4.0. Unter Mitarbeit von Michael ten Hompel, Michael Henke und Uwe Clausen. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML. Online verfügbar unter https://www.innovationslabor-logistik.de/wp-content/uploads/2017/10/07_Whitepaper_CE_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 30.04.2020.

Fischaber, S.; Regett, A.; Schuster, S. F.; Hesse, H. (2016): {Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen: Analyse von Nachnutzungsanwendungen, ökonomischen und ökologischen Potenzialen}. Frankfurt am Main.

Fleischer, J.; Weismann, U.; Nesges, D.; Wawerla, M. (2004): Life-Cycle-Performance in der Produktionstechnik. In: VDI-Z Integrierte Produktion 146 (10), S. 87–90.

Foster, Meaghan; Isely, Paul; Standridge, Charles Robert; Hasan, Md Mehedi (2014): Feasibility assessment of remanufacturing, repurposing, and recycling of end of vehicle application lithium-ion batteries. In: JIEM 7 (3). DOI: 10.3926/jiem.939.

Geissdörfer, Klaus; Gleich, Ronald; Wald, Andreas (2009): Standardisierungspotentiale lebenszyklusbasierter Modelle des strategischen Kostenmanagements. In: Z Betriebswirtsch 79 (6), S. 693–715. DOI: 10.1007/s11573-009-0256-7.

Gharfalkar, Mangesh; Ali, Zulfiqur; Hillier, Graham (2016): Clarifying the disagreements on various reuse options: Repair, recondition, refurbish and remanufacture. In: Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA 34 (10), S. 995–1005. DOI: 10.1177/0734242X16628981.

Glöser-Chahoud, Simon (2017): Quantitative Analyse der Kritikalität mineralischer und metallischer Rohstoffe unter Verwendung eines systemdynamischen Modell-Ansatzes. Unter Mitarbeit von Martin Faulstich. Online verfügbar unter https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/clausthal_mods_00000524.

Groupe Renault (07.05.2020): Groupe Renault is launching “Advanced Battery Storage”, the biggest stationary energy storage system from electric vehicle (EV) batteries in Europe, zuletzt geprüft am 07.05.2020.

Hiebel, M.; Bertling, J.; Nühlen, J.; Pflaum, H.; Somborn-Schulz, A.; Franke, M. et al. (2017): Zirkuläre Wirtschaft: Das neue Wirtschaftsmodell für die chemische Industrie. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.). Studie im Auftrag des Verbands der Chemischen Industrie e.V., Landesverband NRW. Oberhausen.

Hoyer, Claas (2015): Strategische Planung des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen in Deutschland. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Ijomah, Winifred L. (2009): Addressing decision making for remanufacturing operations and design-for-remanufacture. In: International Journal of Sustainable Engineering 2 (2), S. 91–102. DOI: 10.1080/19397030902953080.

Jiao, Na; Evans, Steve (2018): Business Models for Repurposing a Second-Life for Retired Electric Vehicle Batteries. In: Gianfranco Pistoia und Boryann Liaw (Hg.): Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles, Bd. 196. Cham: Springer International Publishing (Green Energy and Technology), S. 323–344.

JvM (2020): Mercedes-Benz Energiespeicher.

Kamper, Achim; Triebs, Johannes; Hollah, Ansgar; Lienemann, Christoph (2019): Remanufacturing of electric vehicles: Challenges in production planning and control. In: Procedia Manufacturing 33, S. 280–287. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.04.034.

Kaufman, Robert J. (1969): Life Cycle Costing: Decision Making Tool For Capital Equipment Acquisitions. In: Journal of Purchasing 5 (3), S. 16–31. DOI: 10.1111/j.1745-493X.1969.tb00599.x.

Ke, Qingdi; Zhang, Hong-chao; Liu, Guangfu; Li, Bingbing (2011): Remanufacturing Engineering Literature Overview and Future Research Needs. In: Jürgen Hesselbach und Christoph Herrmann (Hg.): Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 437–442.

Kimura, Fumihiko (1997): Inverse Manufacturing: from products to services. In: Frank Plonka und Gustav Olling (Hg.): Computer Applications in Production and Engineering. IFIP TC5 International Conference on Computer Applications in Production and Engineering (CAPE '97) 5-7 November 1997, Detroit, Michigan, USA. Boston, MA: Springer (IFIP – The International Federation for Information Processing), S. 383–384. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1007/978-0-387-35291-6_35.

King, Andrew M.; Burgess, Stuart C.; Ijomah, Winnie; McMahon, Chris A. (2006): Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle? In: Sust. Dev. 14 (4), S. 257–267. DOI: 10.1002/sd.271.

Köhler, Uwe (2013): Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen. In: Reiner Korthauer (Hg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, S. 95–106.

Kraftfahrt Bundesamt (2020): Bestand an Pkw am 1. Januar 2020 nach ausgewählten Kraftstoffarten.

Krämer, Stefanie (2007): Total Cost of Ownership. Konzept, Anwendung und Bedeutung im Beschaffungsmanagement deutscher Industrieunternehmen. Saarbrücken: VDM-Verl.

Krämer, Stefanie (2009): Total Cost of Ownership als Instrument des Beschaffungsmanagements. Eine theoretisch-explorative empirische Untersuchung. Zugl.: Erlangen, Friedrich-Alexander-Univ. Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2007. Hamburg: Diplom.de Diplomica-Verl. Online verfügbar unter http://www.diplom.de.

Krimmling, Jörn (2018): Wirtschaftlichkeitsbewertung verstehen und anwenden. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

KrWG: Kreislaufwirtschaftsgesetz Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. KrWG, vom 24.02.2012, 2129–2156, zuletzt geprüft am 14.04.2020.

Lange, Ulrike (2018): Ressourceneffizienz durch Remanufacturing – Industrielle Aufarbeitung von Altteilen. Hg. v. VDI Zentrum REssourceneffizienz. VDI Zentrum REssourceneffizienz. Berln (Kurzanalyse, 18).

Laurent, Alexandre (2019): Stationary energy battery storage systems and related issues – Easy Electric Life.

Lenz, Ulrich (1990): Anbieterauswahl und Möglichkeiten der Vertragsgestaltung unter Berücksichtigung von Informationssuchprozessen und Transaktionskosten. In: Ulrich Lenz (Hg.): Kostensteigerungen bei öffentlichen Aufträgen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, S. 53–103.

Lichtenvort, Kerstin; u.a. (2008): Introduction: History of Life Cycle Costing, Its Categorization, and Its Basic Framework. In: David Hunkeler, Kerstin Lichtenvort und Gerald Rebitzer (Hg.): Environmental Life Cycle Costing. Hoboken: CRC Press, S. 1–16.

Löhle, Stephan; Bartnik, Sabine; Schmiedel, Ute; Borghorst, Lena (2018): Analyse der Datenerhebungen nach ElektroG und UStatG über das Berichtsjahr 2016 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflichten 2018. Zwischenbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Forschungskennzahl 3717 34 345 0). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-10-18_texte_83-2018_analyse-datenerhebung-elektrog.pdf, zuletzt geprüft am 28.04.2020.

Maier, M.; Rosenberg, S.; Gläser-Chahoud, S.; Schultmann, F. (2019): Entwicklung eines ökonomischen Ansatzes zur Entscheidungsunterstützung für kreislauforientierte Produktionsprozesse. Zwischenbericht 2018, 2019.

Martens, Hans; Goldmann, Daniel (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-658-02786-5.pdf, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Mercedes-Benz Energy: Energy storage systems (2020), 2020.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2014a): Abfallvermeidung. Leitmotiv des deutschen Abfallrechts, 2014. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/abfall-und-kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaft/abfallvermeidung/, zuletzt geprüft am 30.04.2020.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2014b): Von der Abfall- zur Kreislaufwirtschaft. Ressourcen gewinnen und schonen, 2014. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/abfall-und-kreislaufwirtschaft/kreislaufwirtschaft/von-der-abfall-zur-kreislaufwirtschaft/, zuletzt geprüft am 30.04.2020.

Natkunarajah, Nirugaa; Scharf, Matthias; Scharf, Peter (2015): Scenarios for the Return of Lithium-ion Batteries out of Electric Cars for Recycling. In: Procedia CIRP 29, S. 740–745. DOI: 10.1016/j.procir.2015.02.170.

Nguyen, H., Stutchey, M., Zils, M (2014): Remaking the industrial economy. Hg. v. McKinsey. Online verfügbar unter https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/remaking-the-industrial-economy#, zuletzt aktualisiert am 01.05.2020, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Nissan Deutschland (2016): Nissan Stromspeicher für Zuhause: Mit xStorage clever speichern und sparen. Online verfügbar unter https://germany.nissannews.com/de-DE/releases/release-145212-nissan-stromspeicher-f-r-zuhause-mit-xstorage-clever-speichern-und-sparen, zuletzt geprüft am 07.05.2020.

Parker, David; Butler, Phil (2007): An Introduction to Remanufacturing. Hg. v. Centre for Remanufacturing and Reuse in partnership with Envirowise.

Poggensee, Kay (2015): Investitionsrechnung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Potting, José; Hekkert, Marko; Worrel, Ernst; Hanemaaijer, Aldert (2017): Circular economy: Measuring innovation in the product chain. The Hague.

Prakash, Siddharth; Dehoust, Günther; Schleicher, Tobias (2016): Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz". Forschungskennzahl 3713 32

315. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_11_2016_einfluss_der_nutzungsdauer_von_produkten_obsoleszenz.pdf, zuletzt geprüft am 15.04.2020.

Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Rüdenauer, Ina; Greißhammer, Rainer (2004): Produkt-Nachhaltigkeitsanalyse von Waschmaschinen und Waschprozessen. Hg. v. Öko-Institut e.V. Freiburg (PROSA Waschmaschinen). Online verfügbar unter https://www.oeko.de/oekodoc/257/2004-036-de.pdf, zuletzt geprüft am 15.04.2020.

Scheelhaase, T.; Zinke, G. (2016): Potenzialanalyse Zirkulaere Wertschoepfung in NRW.

Kienbaum EPEA Studie 2016. Hg. v. Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk NRW.

Schild, Ulrich (2005): Lebenszyklusrechnung und lebenszyklusbezogenes Zielkostenmanagement. Stellung im internen Rechnungswesen, Rechnungsausgestaltung und modellgestützte Optimierung der intertemporalen Kostenstruktur. @Göttingen, Univ., Diss., 2004. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-81916-1.

Schmiedel, Ute; Löhle, Stephan; Bartnik, Sabine (2018): Verbraucherumfrage zum Entsorgungsverhalten von Elektro(nik)altgeräten. Hg. v. Umweltbundesamt. Deassau (Forschungskennzahl 3717 34 345 0).

Standridge, Charles Robert; Hasan, Md Mehedi (2015): Post-vehicle-application lithium-ion battery remanufacturing, repurposing and recycling capacity. Modeling and analysis. In: Journal of Industrial Engineering and Management 8 (3). DOI: 10.3926/jiem.1418.

Statista, Umfrage (2016): Statista-Umfrage Haushaltsgeräte 2016. Hg. v. Statista.com. Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/171472/umfrage/marke-der-waschmaschine-in-deutschland/, zuletzt geprüft am 15.04.2020.

Steinhilper, Rolf (1998): Remanufacturing. The ultimate form of recycling. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.

Sundin, Erik; Bras, Bert (2005): Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing. In: Journal of Cleaner Production 13 (9), S. 913–925. DOI: 10.1016/j.jclepro.2004.04.006.

Tesla (2020): Powerpack – Energiespeicherlösungen für Gewerbe und Energieversorger, 2020. Online verfügbar unter https://www.tesla.com/de_DE/powerpack?redirect=no, zuletzt geprüft am 07.05.2020.

DIN EN ISO 14051: Umweltmanagement – Materialflusskostenrechnung – Allgemeine Rahmenbedingungen (ISO 14051:2011); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14051:2011, zuletzt geprüft am 08.04.2020.

Westkämper, Engelbert; Warnecke, Hans-Jürgen (2010): Einführung in die Fertigungstechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Wewer, Aleksandra; Guidat, Thomas (2019): Shifting Remanufactured Products from Used to New. In: Alexandra Pehlken, Matthias Kalverkamp und Rikka Wittstock (Hg.): Cascade Use in Technologies 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 8–12.

Wieland, M.; Gerhard, S.; Schmidt, A. (2017): Model-based Lifetime Analysis of 2nd-life Lithium-Ion Battery Storage Systems for Stationary Applications. In: Detlef Schulz (Hg.): NEIS Conference 2016. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 175–181.

Woodward, David G. (1997): Life cycle costing—Theory, information acquisition and application. In: International Journal of Project Management 15 (6), S. 335–344. DOI: 10.1016/S0263-7863(96)00089-0.

Yamasue, Eiji; Cravioto, Jordi; Nguyen, Duc Quang; Oguchi, Masahiro; Daigo, Ichiro (2017): Lifetime Analysis for Electronic Devices in Vietnam. In: Procedia CIRP 61, S. 152–154. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.269.

Yuan, Zengwei; Bi, Jun; Moriguichi, Yuichi (2006): The Circular Economy: A New Development Strategy in China. In: Journal of Industrial Ecology 10 (1-2), S. 4–8. DOI: 10.1162/108819806775545321.

Impressum

Titel
Betriebswirtschaftliche Bewertung der Kreislaufwirtschaft –
Strategische Entscheidungsunterstützung für kreislauforientierte Produktionssysteme

Herausgeber
THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien
c/o Unternehmer BW e. V.
Türlenstrasse 2, 70191 Stuttgart
Homepage: www.thinktank-irs.de
LinkedIn: THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

Autoren
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)
Lehrstuhl für Betriebswirtschaftslehre, insb. Produktionswirtschaft und Logistik

M. Sc. Sonja Rosenberg
Dr. Marina Maier
Dr. Simon Glöser-Chahoud
Prof. Dr. Frank Schultmann

Stand
Veröffentlicht 10/2025

Grafische Konzeption, Illustration, Satz
unger+ kreative strategen GmbH, Stuttgart, www.ungerplus.de

Copyright
Wiedergaben in jeglicher Form, auch in Auszügen, müssen mit Quellenangaben gekennzeichnet werden.

Verteilerhinweis
Der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien ist finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.