VDI Zentrum Ressourceneffizienz

Im Auftrag des:
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands

Remanufacturing von Produkten

Juni 2021

Studie: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands – Remanufacturing von Produkten

Autor und Autorin:

Dr.-Ing. Constantin Herrmann, Sphera Solutions GmbH
Dr.-Ing. Olga Vetter, Sphera Solutions GmbH

Fachlicher Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Christof Oberender, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir danken Herrn Wilhelm Mauß, Geschäftsführer der Lorenz GmbH & Co.KG, für die Zusammenarbeit und seine fachliche Unterstützung.

Die Studie wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit erstellt.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bülowstraße 78
10783 Berlin
Tel. +49 (0)30 2759506-0
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © panthermedia.net/nd3000
Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:
Studien

Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands

Remanufacturing von Produkten

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS 5

TABELLENVERZEICHNIS 7

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS 9

KURZFASSUNG 11

1 EINLEITUNG 16
1.1 Einführung in das Thema Kreislaufwirtschaft 16
1.2 Hintergrund der Studie 19
1.3 Ziele und Vorgehensweise der Studie 20

2 STAND DER TECHNIK UND MARKTSITUATION 23
2.1 Stand der Technik 23
2.1.1 Grundlagen des Remanufacturing 23
2.1.2 Prozessschritte und technische Aspekte 26
2.1.3 Geschäftsmodelle und weitere Aspekte 30
2.2 Marktrelevanz und Markttrends 33

3 BEWERTUNG VON PRODUKTGRUPPEN FÜR DAS REMANUFACTURING 37
3.1 Bewertungssystem 37
3.1.1 Auswahl der Bewertungsaspekte 37
3.1.2 Entwicklung einer Bewertungsmatrix 37
3.2 Auswahl der Produktbeispiele 41
3.3 Bewertung der Produktbeispiele 42
3.3.1 Flugzeugtriebwerke 42
3.3.2 Anlasser und Lichtmaschinen 46
3.3.3 Verbrennungsmotoren für Automobile und Kleintransporter 48
3.3.4 Laptops 53
3.3.5 Desktop PCs 57
3.3.6 Wasserzähler 60
3.3.7 Medizintechnische Geräte 63
3.3.8 Wohnmöbel und Haushaltsmöbel 66

3.4 Zusammenfassende Bewertung 69

4 FÖRDERNDE UND HEMMENDE FAKTOREN FÜR DAS REMANUFACTURING 73
4.1 Treiber für das Remanufacturing 73
4.2 Hemmnisse für das Remanufacturing 76
4.3 Vorgehen zur Einführung eines zirkulären Produktsystems 82

5 ÖKOBILANZ, KRITIKALITÄT UND KOSTENBEWERTUNG 86
5.1 Einführung in das Thema Ökobilanz 86
5.2 Ziel und Rahmendefinition der vergleichenden Lebenszyklusanalysen 88
5.2.1 Ziel der vergleichenden Lebenszyklusanalysen 88
5.2.2 Untersuchungsrahmen 89
5.2.3 Sachbilanz 94
5.2.4 Sensitivitätsanalysen 98
5.3 Ergebnisse der vergleichenden Lebenszyklusanalysen 99
5.3.1 Ergebnisse der ökologischen Bewertung des Basisszenarios 99
5.3.2 Ergebnisse der Rohstoffkritikalität 102
5.3.3 Ergebnisse der ökonomischen Bewertung 110
5.3.4 Sensitivitätsanalysen 112
5.4 Bewertung der vergleichenden Lebenszyklusanalysen 115

6 ERKENNTNISSE UND EMPFEHLUNGEN 118
6.1 Erkenntnisse 118
6.2 Handlungsempfehlungen 123

LITERATURVERZEICHNIS 128

ANHANG - ÖKOLOGISCHE ERGEBNISSE 135

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Modell der Linearwirtschaft (engl. Linear Economy) 16

Abbildung 2: Modell der Kreislaufwirtschaft (engl. Circular Economy) 17

Abbildung 3: Die zehn Optionen der Kreislaufwirtschaft 18

Abbildung 4: Darstellung des Remanufacturing 23

Abbildung 5: Bausteine einer Kreislaufwirtschaft 25

Abbildung 6: Hauptprozessschritte des Remanufacturing 27

Abbildung 7: Geschäftsbereiche und Aspekte des Remanufacturing 31

Abbildung 8: Umsatz der Remanufacturing-Branche in Deutschland im Jahr 2017 35

Abbildung 9: Praktische Anleitung zur Einführung eines zirkulären Produktsystems, der Sechs-Schritte-Ablaufplan 83

Abbildung 10: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 86

Abbildung 11: Aufputzzähler der Firma Lorenz 90

Abbildung 12: Systemgrenzen des Lebenszyklus von neu hergestellten Wasserzählern 91

Abbildung 13: Systemgrenzen des Lebenszyklus von aufgearbeiteten Wasserzählern 91

Abbildung 14: Prozessablauf zur Herstellung eines neuen Wasserzählers 92

Abbildung 15: Prozessablauf zur einfachen Aufarbeitung eines Wasserzählers 92

Abbildung 16: Prozessablauf zur aufwändigen Aufarbeitung eines Wasserzählers 93

Abbildung 17: Treibhausgasemissionen der Lebenszyklusphasen, Basisszenario 100

Abbildung 18: Detailansicht Treibhausgasemissionen, Herstellung Neuware 101

Abbildung 19: Relative Herstellkosten nach Arbeitsaufwand 112

Abbildung 20: Entwicklung von kreislauffähigen Produkten und Geschäftsmodellen 125

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Umsatzentwicklung im deutschen Remanufacturing-Markt 2015 – 2017	35
Tabelle 2:	Mitarbeiter in der deutschen Remanufacturing-Industrie 2015 – 2017	36
Tabelle 3:	Übersicht technischer Aspekte und Design	39
Tabelle 4:	Übersicht technischer Aspekte und reverser Logistik	39
Tabelle 5:	Übersicht der Geschäftsmodelle	40
Tabelle 6:	Übersicht der weiteren Aspekte	40
Tabelle 7:	Übersicht der Produktbeispiele	42
Tabelle 8:	Bewertungsmatrix: Flugzeugtriebwerke	44
Tabelle 9:	Bewertungsmatrix: Anlasser und Lichtmaschinen	47
Tabelle 10:	Bewertungsmatrix: Verbrennungsmotoren für Automobile und Kleintransporter	51
Tabelle 11:	Bewertungsmatrix: Laptops	55
Tabelle 12:	Bewertungsmatrix: Desktop PCs	58
Tabelle 13:	Bewertungsmatrix: Wasserzähler	61
Tabelle 14:	Bewertungsmatrix: medizintechnische Geräte	64
Tabelle 15:	Bewertungsmatrix: Wohn- und Haushaltsmöbel	67
Tabelle 16:	Zusammenfassende Bewertung aller Beispielprodukte	70
Tabelle 17:	Bezeichnung und Rahmenbedingungen der Sensitivitätsanalysen	99
Tabelle 18:	Ökologische Wirkungen Basisszenario	99
Tabelle 19:	Rohstoffkritikalität – Elektronik Wasserzähler	104
Tabelle 20:	Rohstoffkritikalität – Batterie Wasserzähler	106

Tabelle 21:	Rohstoffkritikalität – Herstellung Gehäuse und Mechanik der Neuware	107
Tabelle 22:	Rohstoffkritikalität – aufwändige Aufarbeitung	109
Tabelle 23:	Überblick über Aufarbeitungsvarianten	111
Tabelle 24:	Relative Veränderung der ökologischen Ergebnisse der Aufarbeitung	113
Tabelle 25:	Ökologische Ergebnisse: Aufarbeitung	135
Tabelle 26:	Ökologische Ergebnisse: Neuware	135

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
CEID	Circular Economy Initiative Deutschland
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEE	Electric and Electronic Equipment (elektrische und elektronische Produkte)
ELV	End of Life of Vehicle Directive
EN	Europäische Norm
ERN	European Remanufacturing Network
EU	Europäische Union
Eurostat	Statistisches Amt der Europäischen Union
IEC	International Electrotechnical Commission (Internationale Elektrotechnische Kommission)
IMDS	International Material Data System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
KEA	Kumulierter Energieaufwand
kg CO_2-eq	Kilogramm CO_2-Äquivalente
km	Kilometer
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
kWh	Kilowattstunde(n)

LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
MJ	Megajoule
MRO	Maintenance, Repair and Overhaul (Wartung, Reparatur und Remanufacturing)
NMR	Nuclear Magnetic Resonance (Kernspinresonanzspektroskop)
TE	Thermische Energie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.

KURZFASSUNG

Die Kreislaufwirtschaft (engl. Circular Economy) bezeichnet eine Wirtschaft, bei der Ressourcen über eine möglichst lange Nutzungsphase in einem möglichst geschlossenen Kreislaufsystem gehalten werden. Im Gegensatz dazu werden in der traditionellen linearen Wirtschaft (engl. Linear Economy), auch „Wegwerfwirtschaft“ genannt, Ressourcen aus der Umwelt entnommen, zu Materialien verarbeitet und daraus Produkte hergestellt. Nach der Nutzung werden die Produkte als Abfall entsorgt. Dies resultiert jedoch häufig in einem hohen Ressourcenverbrauch.

Die vorliegende Studie setzt sich mit dem Thema des Remanufacturing auseinander. Remanufacturing stellt eine Möglichkeit dar, Produkte oder Komponenten über ihre ursprünglich geplante Lebensdauer im Wirtschaftskreislauf zu halten und somit einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft zu leisten. Die Erkenntnisse aus der Ökobilanzierung und den Kostenberechnungen der Studie sollen kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bei Entscheidungen über wichtige produkt- und prozessbezogene Veränderungen unterstützen.

Die Studie untersucht, welche Aufwendungen an Material, Energie, Wasser und Fläche über den gesamten Lebensweg entstehen, wenn Produkte über ein Remanufacturing im Kreislauf gehalten oder als Neufertigung hergestellt werden. Als Referenzprodukt dienen die Wasserzähler der Firma Lorenz GmbH & Co. KG aus Ingstetten (Schelkingen). Eine Ökobilanz bewertet die Lebenszyklen anhand der Phasen Herstellung, Transport, Nutzung und Entsorgung mit Hilfe der Indikatoren Wasserverbrauch, Flächeninanspruchnahme, kumulierter Rohstoffaufwand, kumulierter Energieaufwand und Treibhauspotenzial. Sie wird ergänzt durch eine Rohstoffkritikalitätsanalyse und eine Kostenbewertung.

Folgende Forschungsfragen werden beantwortet:

- Welche Aufwendungen an Material, Energie, Wasser und Fläche entstehen über den gesamten Lebensweg der Referenzprodukte (aus Remanufacturing und einer erneuten Neufertigung)?

- Welche Emissionen, ausgedrückt in CO_2-Äquivalenten, ergeben sich je Variante (Remanufacturing und Neufertigung)?

- Welche versorgungskritischen Rohstoffe werden bei den Referenzprodukten aus Remanufacturing und Neufertigung verwendet bzw. eingespart?

- Welche Kosten entstehen für die betrachteten Varianten?

Es zeigt sich, dass die Umweltwirkungen der aufgearbeiteten Wasserzähler um mindestens 90 % niedriger ausfallen als bei den neu hergestellten Wasserzählern. Dies liegt vor allem daran, dass die Firma Lorenz ein Geschäftsmodell umgesetzt hat, das auf Kreislaufwirtschaft ausgerichtet ist, und dieses mit einem an den Eigenschaften der Wasserzähler ausgerichteten Remanufacturing-System in Einklang bringt. Die Wasserzähler werden im Kreislauf gehalten und entsprechend ihrem Zustand so aufgearbeitet, dass eine in Qualität und Funktion identische Nutzung sichergestellt wird, nämlich die geeichte Quantifizierung einer Wassermenge über fünf bzw. sechs Jahre (für Warm- bzw. Kaltwasserzähler). Dabei kann ein Großteil der verbauten Komponenten (Gehäuse, Mechanik, Elektronik) wiederverwendet werden, nur wenige Teile müssen getauscht werden (Batterie, Haube). Dies führt zur beschriebenen deutlichen Reduzierung der Umweltwirkungen. Durch den signifikant geringeren Materialbedarf bei der Aufarbeitung ist auch die Rohstoffkritikalität entsprechend niedriger. Insbesondere die Wiederverwendung von Elektronik und Gehäuse leistet hier einen großen Beitrag. Auch aus ökonomischer Sicht zeigt sich die Vorteilhaftigkeit des Remanufacturing: Die Firma Lorenz erstattet je nach Zustand der Wasserzähler einen variablen Betrag an die Kunden. Dieser Betrag ist so gewählt, dass sich die Herstellkosten für die Aufarbeitung unabhängig vom Zustand der Wasserzähler immer auf rund die Hälfte der Herstellkosten der Neuware belaufen. Neben den ökonomischen (geringere Herstellkosten, niedrigere Rohstoffkritikalität) und ökologischen Vorteilen (deutlich geringere Umweltwirkungen) für den Hersteller ergibt sich noch ein weiterer Vorteil für die Kunden: Durch die Erstattung für die Rückgabe der Wasserzähler mit abgelaufener Eichung sinken die kundenseitigen Kosten. Es zeigt sich, dass die Aufarbeitung von Wasserzählern durch die Firma Lorenz für alle beteiligten Akteure vorteilhaft ist.

Im Einzelnen baut sich die Studie aus folgenden Inhalten auf:

Kapitel 1 gibt mit der Einleitung eine Einführung in das Thema Kreislaufwirtschaft, erläutert den Hintergrund der Studie und zeigt die Ziele sowie die Vorgehensweise der Studie auf.

In Kapitel 2 werden Grundlagen des Remanufacturing, Stand der Technik und die Marktsituation dargestellt. Darin werden auch vier Hauptaspekte für erfolgreiches Remanufacturing identifiziert: Produktdesign, Sammel- und Rückführsysteme, Geschäftsmodelle sowie weitere Aspekte wie Risikofaktoren, Wertwahrnehmung und das Angebot an qualifizierten Mitarbeitern.

In Kapitel 3 werden unterschiedliche Produktgruppen anhand festgelegter Kriterien nach ihrer Eignung für das Remanufacturing bewertet. Hierzu wird eine Bewertungsmethode vorgestellt, mit deren Hilfe die Industrie wie auch KMU und interessierte Kreise transparent den Bewertungsablauf nachvollziehen und die Potenziale des Remanufacturing selbst ermitteln können. Es wird eine Bewertungsmatrix entwickelt, die auch von KMU genutzt werden kann, um Produkte oder Produktgruppen auf ihre Eignung für ein Remanufacturing zu prüfen.

In Kapitel 4 werden Treiber und Hemmnisse für das Remanufacturing beschrieben. Diese werden aus einer Literaturrecherche sowie der Bewertung von Produktbeispielen abgeleitet. Gewonnene Erkenntnisse helfen, eine Entscheidung zur anschließenden Durchführung von Ökobilanzen zu treffen und abzuwägen, inwiefern die Ergebnisse aus der Bilanzierung den eigenen Geschäftsmodellen nutzen können. Kapitel 4.3 liefert eine praktische Anleitung in Form eines sechs Schritte umfassenden Ablaufplans, mittels dessen Akteure ein Geschäftsmodell zum Remanufacturing entwickeln können, wenn keine offensichtlichen Produkt- und Systemeigenschaften zur Kreislauffähigkeit erkennbar sind.

Kapitel 5 gibt eine kurze Einführung in das Thema Ökobilanz und beschäftigt sich detailliert mit der Ökobilanzierung und Lebenszyklusbewertung am Beispiel des Wasserzählers der Firma Lorenz GmbH & Co. KG. Die Ökobilanzierung wird ergänzt durch eine Rohstoffkritikalitätsanalyse und eine Kosten-

bewertung. Die Ergebnisse liefern wichtige Informationen darüber, inwieweit die Methodik der Bewertung des Ressourcenaufwands bei der Entscheidung helfen kann, in Remanufacturing zu investieren.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 6 beschrieben und daraus Handlungsempfehlungen für Unternehmen und Politik abgeleitet, die zur Analyse des Potenzials sowie zur Umsetzung von Remanufacturing herangezogen werden können.

Im Rahmen der Studie wird deutlich, dass für erfolgreiches Remanufacturing eine Kombination aller vier identifizierten Hauptaspekte gegeben sein muss:

- **Produktdesign:** Kreislauffähige Produkte sind demontagefreundlich, modular aufgebaut, klar identifizierbar und langlebig. Dies ermöglicht eine einfache Aufarbeitung.

- **Sammel- und Rückführsysteme:** Sie beeinflussen entscheidend die Verfügbarkeit von Produkten für die Aufarbeitung. Der Sammelaufwand sollte im Verhältnis zum Produktwert dabei möglichst gering und die Rücklaufquoten sollten planbar sein.

- **Geschäftsmodell:** Remanufacturing hat eine andere Kostenstruktur als die Herstellung von Neuware, da Prozessschritte der Fertigung entfallen, aber zusätzliche Kosten z. B. für Rückführung und Wareneingangskontrolle hinzukommen. Auch die Wahrnehmung der Produkte durch Kunden kann anders als bei Neuware sein, was sich eventuell ebenso auf die Wertwahrnehmung und damit den Kaufpreis auswirken kann.

- **Weitere Aspekte:** Gesetzliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen können Einfluss auf Rücknahmesysteme oder Gewährleistungen haben. Auch das Angebot an qualifizierten Mitarbeitern ist entscheidend für die Möglichkeiten des Remanufacturing.

Sind diese Aspekte nicht erfüllt, können sie systematisch aufgebaut werden, um erfolgreich aufgearbeitete Produkte am Markt zu etablieren. Dies zeigt sich am Beispiel der Wasserzähler. Durch den systematischen Aufbau von Sammelsystemen wurde ein lukratives und ökologisch vorteilhaftes Geschäftsmodell im Markt geschaffen.

Um vermehrt erfolgreiche Produkte und Märkte für Remanufacturing zu etablieren, schließen die Handlungsempfehlungen mit folgender Kernbotschaft ab: Förderung von Information, Innovation und Kollaboration.

1 EINLEITUNG

1.1 Einführung in das Thema Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft (engl. Circular Economy) gewinnt in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung, obwohl heute die Denkweise „nehmen, benutzen, wegwerfen“ (engl. take, make, dispose) in der Wirtschaft und Gesellschaft immer noch weit verbreitet ist[1].

Die Kreislaufwirtschaft bezeichnet eine Wirtschaft, bei der im Gegensatz zur traditionellen linearen Wirtschaft (engl. Linear Economy) Ressourcen über eine möglichst lange Nutzungsphase in einem möglichst geschlossenen Kreislaufsystem gehalten werden[2]. In einer linearen Wirtschaft („Wegwerfwirtschaft“) werden Ressourcen aus der Umwelt gewonnen, in und durch Produkte genutzt und danach als Abfall entsorgt. Abbildung 1 und Abbildung 2 stellen die beiden Wirtschaftsmodelle dar.

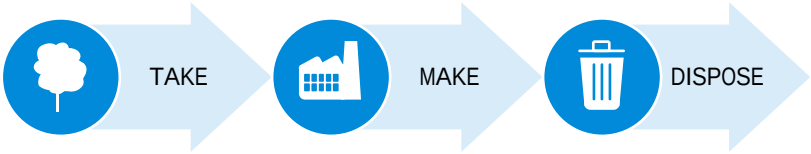

Abbildung 1: Modell der Linearwirtschaft (engl. Linear Economy)[3]

[1] Vgl. Lange, U. (2017), S. 9 ff. & VDI e.V. (2019), S. 2 ff. & Ellen MacArthur Foundation (2013a), S. 1 ff.

[2] Vgl. Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, K.; Ramkumar, S. und Peck, D. (2015), S. 2 ff. & Ellen MacArthur Foundation (2013a), S. 1 ff.

[3] In Anlehnung an Sphera (2020d).

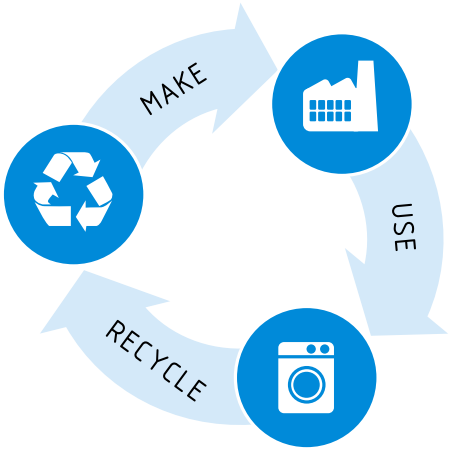

Abbildung 2: Modell der Kreislaufwirtschaft (engl. Circular Economy)[4]

Das Thema Kreislaufwirtschaft ist sehr breit und wird aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet. Um die Entnahme der Rohstoffe aus der Umwelt sowie Abfälle und Emissionen so weit wie möglich zu verringern, setzt die Kreislaufwirtschaft eine Veränderung der Art und Weise der Produktion und des Verbrauchs voraus. Produkte und eingesetzte Materialien sollen so lange wie möglich genutzt, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden. Alles, was einmal aus der Umwelt in die Technosphäre gelangt ist, soll als Wert erhalten bleiben und verwendet werden.

Zehn moderne Kreislaufwirtschaftsoptionen bilden das Gesamtkonzept, das als das 9R-Rahmenkonzept[5] bekannt und in drei Bereiche untergliedert ist (vgl. Abbildung 3). Das Konzept bietet wirtschaftliche, ökologische sowie gesellschaftliche Vorteile und trägt langfristig zur Stabilität der Gesellschaft bei[6]. Es steht im Einklang mit der Zielhierarchievorgabe des Kreislaufwirtschaftsgesetzes Vermeiden, Verwenden, stoffliches Verwerten, energetisches Verwerten und Beseitigen[7]. Auch innerhalb aktueller Entwicklungen

[4] In Anlehnung an Sphera (2020d).
[5] Vgl. Kirchherr, J.; Reike, D. und Hekkert, M. (2017), S. 221 – 232.
[6] Vgl. Buchberger, S.; Hofbauer, G.; Mangold, L. und Truong, K. (2019), S. 18.
[7] Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1994).

der europäischen Normen- und Gesetzesentwicklung sowie bei deren nationalen Umsetzungen behält diese Hierarchie im Grundgedanken ihre Gültigkeit[8].

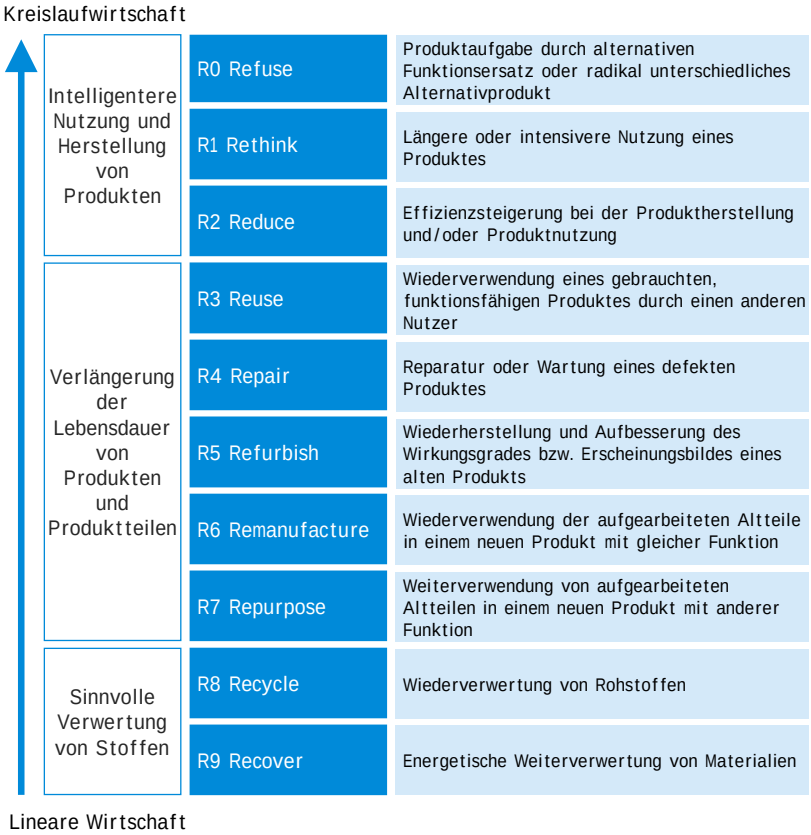

Abbildung 3: Die zehn Optionen der Kreislaufwirtschaft[9]

Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft stellt einen systemischen Prozess dar. Mit den Optionen Refuse, Rethink und Reduce (R0 bis R2) werden die Bereiche Herstellung, Produktnutzung und Logistik optimiert und intelligen-

[8] Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020).

[9] In Anlehnung an Kirchherr, J.; Reike, D. und Hekkert, M. (2017), S. 224 & Buchberger, S.; Hofbauer, G.; Mangold, L. und Truong, K. (2019), S. 11.

ter gestaltet. Dafür werden Kenntnisse über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts gesammelt und bei der Entwicklung eines neuen Produkts oder einer Funktion verwendet. Die Konzepte Re-use, Repair, Refurbish, Remanufacture und Repurpose (R3 bis R7) beschäftigen sich mit einer Wieder- oder Weiterverwendung von gebrauchten Produkten und Produktteilen, um die Produktlebensdauer oder Produktnutzungszyklen möglichst lange auszudehnen. Die einzelnen Produktteile können an unterschiedlichsten Stellen im Wertschöpfungsprozess wieder integriert werden. Bei den Maßnahmen Recycle und Recover (R8 und R9) werden Altprodukte, die nicht mehr wieder- oder weiterverwendet werden können, der Rückgewinnung von Rohstoffen bzw. der energetischen Verwertung zugeführt[10].

In Bezug auf Remanufacturing sieht das Kreislaufwirtschaftskonzept eine industrielle Aufarbeitung von Altteilen (engl. Cores) und ihre Wiederverwendung für die Herstellung eines neuen Produkts mit gleicher Funktion vor. Diese Vorgehensweise bietet produzierenden Unternehmen in vielen Branchen ein sehr großes, aber noch nicht ausreichend genutztes Potenzial[11]. Mit Remanufacturing können insbesondere im Industrieland Deutschland neue Perspektiven für eine wirtschaftliche und umweltfreundliche Produktion eröffnet werden[12].

1.2 Hintergrund der Studie

Obwohl das Remanufacturing eine signifikante Ressourceneinsparung ermöglichen kann, sind nicht alle Produkte gleich gut für das Remanufacturing geeignet. Oftmals stehen technische, logistische oder marktstrategische Randbedingungen im Wege, sodass eine Lebenszyklusanalyse nützlich ist[13]. Sie quantifiziert das Potenzial an Ressourceneinsparung und zeigt mögliche Hindernisse auf, um diesen gezielt entgegenwirken zu können.

Häufig steht das Thema Remanufacturing im Konflikt zwischen Hemmnissen und Treibern. Zu den hemmenden Trends gehören beispielsweise Mini-

[10] Vgl. Kirchherr, J.; Reike, D. und Hekkert, M. (2017), S. 221 – 232.
[11] Vgl. Ellen MacArthur Foundation (2013b), S. 4 – 8.
[12] Vgl. Buchberger, S.; Hofbauer, G.; Mangold, L. und Truong, K. (2019), S. 1 – 2.
[13] Vgl. Lange, U. (2017), S. 21 f.

aturisierung in der Elektronik, „Smartness“ auf Chip-Ebene, Einsatz unterschiedlichster Materialien oder geringere Akzeptanz gegenüber wiederaufgearbeiteten Altprodukten. Als Treiber wirken z. B. Preissenkung, Ressourceneffizienz, ein geringerer ökologischer Fußabdruck oder nachhaltige, langlebige Geschäftsmodelle. In diesem Zusammenhang ist es immer empfehlenswert, Neuprodukte und wiederaufgearbeitete Produkte in ökonomischer und ökologischer Hinsicht miteinander zu vergleichen.

Als Instrumente eignen sich hierfür Ökobilanzen (engl. Life Cycle Assessment bzw. LCA) und Lebenszykluskostenrechnungen, die aufgrund ihrer Herangehensweisen und methodischen Ansätze, den gesamten Lebenszyklus zu betrachten, gut harmonisieren. Die Ergebnisse können für Industrie und Gewerbe nachvollziehbar und verständlich aufbereitet werden. Wichtige Indikatoren sind beispielsweise Emissionen von Treibhausgasen, Ressourcenverbrauch von Land, Wasser, Energie und Rohstoffen kombiniert mit einer Kostenrechnung und ergänzt durch Rohstoff-Kritikalitätsuntersuchungen.

Die vorliegende Studie setzt sich mit dem Thema des Remanufacturing auseinander und führt Ökobilanzierungen sowie Lebenszykluskostenrechnungen durch. Die Erkenntnisse aus der Studie sollen kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bei Entscheidungen über wichtige produkt- und prozessbezogene Veränderungen unterstützen.

1.3 Ziele und Vorgehensweise der Studie

Ziel der Studie ist die Durchführung einer vergleichenden ökologischen und ökonomischen Bewertung des Remanufacturing eines Produkts im Vergleich zur Neufertigung.

Untersucht wird ein Wasserzähler der Firma Lorenz GmbH & Co. KG. Diese fertigt und bietet Wasserzähler als Neuprodukt und als aufgearbeitetes Produkt an. Beide Produktvarianten werden über den Lebenszyklus hinweg untersucht, miteinander verglichen und bewertet und dienen als Referenzprodukte für die Studie.

Im Rahmen der ökologischen Bewertung werden Umweltauswirkungen über den gesamten Lebensweg gemäß den Normen DIN EN ISO 14040[14] und DIN EN ISO 14044[15] sowie den Richtlinien VDI 4600[16] und VDI 4800 Blatt 1[17] und Blatt 2[18] innerhalb festgelegter Systemgrenzen vergleichend ermittelt. Um eine Vergleichbarkeit des aufgearbeiteten Produkts mit dessen Neufertigung über den gesamten Lebensweg zu gewährleisten, wird eine geeignete funktionelle Einheit definiert. Die Interpretationen der Ergebnisse erfolgen mit Fokus auf Treibhausgasemissionen in CO_2-Äquivalenten. Darüber hinaus wird eine Rohstoffkritikalitätsanalyse nach VDI 4800 Blatt 2[19] für die Dimension des Versorgungsrisikos durchgeführt.

Eine vergleichende ökonomische Analyse baut auf der ökologischen Bewertung auf und gibt Aufschluss über die Wirtschaftlichkeit des Remanufacturing im Vergleich zur Neufertigung eines Produkts aus Sicht des Herstellers. Im Rahmen der ökonomischen Bewertung wird eine vergleichende Herstellkostenrechnung durchgeführt.

Folgende Forschungsfragen werden untersucht und beantwortet:

- Welche Aufwendungen an Material, Energie, Wasser und Fläche entstehen über den gesamten Lebensweg der Referenzprodukte aus Remanufacturing und einer Neufertigung?
- Welche Emissionen, ausgedrückt in CO_2-Äquivalenten, ergeben sich je Variante (Remanufacturing und Neufertigung)?
- Welche versorgungskritischen Rohstoffe werden bei den Referenzprodukten aus Remanufacturing und Neufertigung verwendet bzw. eingespart?
- Welche Kosten entstehen für die betrachteten Varianten?

[14] DIN EN ISO 14040:2006.
[15] DIN EN ISO 14044:2006.
[16] VDI 4600 Blatt 1:2015-08.
[17] VDI 4800 Blatt 1:2016-02.
[18] VDI 4800 Blatt 2:2018-03.
[19] VDI 4800 Blatt 2:2018-03.

In Kapitel 2 werden Grundlagen des Remanufacturing, Stand der Technik und die Marktsituation dargestellt.

In Kapitel 3 erfolgt eine Bewertung unterschiedlicher Produkte, um zu ermitteln, welche Produktgruppen für das Remanufacturing gut geeignet sind. Hierzu wird eine Bewertungsmethode vorgeschlagen, mit deren Hilfe die Industrie, kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sowie interessierte Kreise transparent den Bewertungsablauf nachvollziehen und die Potenziale des Remanufacturing selbst ermitteln können.

In Kapitel 4 werden Treiber und Hemmnisse für das Remanufacturing beschrieben. Gewonnene Erkenntnisse helfen, eine Entscheidung zur Durchführung von Ökobilanzen treffen zu können und abzuwägen, inwiefern Ergebnisse daraus den eigenen Geschäftsmodellen nutzen können. Das Vorgehen dazu liefert Kapitel 4.3.

Kapitel 5 gibt eine kurze Einführung in das Thema Ökobilanz und beschäftigt sich danach detailliert mit der Ökobilanzierung und Lebenszyklusbewertung am praktischen Beispiel des Wasserzählers der Firma Lorenz GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse liefern wichtige Informationen, inwieweit die Methodik der Bewertung des Ressourcenaufwands hinsichtlich einer Investitionsentscheidung für ein Remanufacturing verwendbar sein kann.

Die gewonnenen Erkenntnisse und Empfehlungen werden in Kapitel 6 beschrieben.

Zielgruppen dieser Studie sind Produktnutzer, Maschinen- und Anlagenhersteller (KMU und Nicht-KMU), Beratungsunternehmen und Forschungsinstitutionen. Darüber hinaus gelten die Erkenntnisse aus der Studie als Informationsquelle für Initiativen und Verbände sowie Einrichtungen des Bundes, der Länder und deren Vertreter.

2 STAND DER TECHNIK UND MARKTSITUATION

2.1 Stand der Technik

2.1.1 Grundlagen des Remanufacturing

Unter Remanufacturing versteht man eine Behandlung zur Wiederverwendung eines gebrauchten Produkts, welches durch verschiedene Prozessschritte auf mindestens das Qualitätsniveau eines Neuprodukts aufbereitet wird[20]. Abbildung 4 zeigt schematisch das Remanufacturing im Kontext des Produktlebenszyklus.

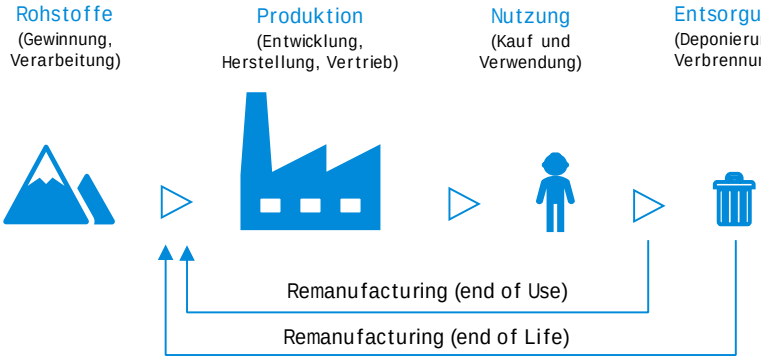

Abbildung 4: Darstellung des Remanufacturing[21]

Das Remanufacturing stellt einen industriellen Aufarbeitungsprozess dar und beinhaltet mehrere Prozessschritte. Im Allgemeinen werden die gesammelten Altteile zuerst demontiert, dann gereinigt, geprüft, aufgearbeitet und schließlich wieder montiert (vgl. Kapitel 2.1.2)[22]. Dabei erfolgt die Zerlegung eines Produkts mit dem Ziel, wieder ein neuwertiges Produkt bereitzustellen.

Das Refurbishing hingegen besteht in der Aufarbeitung eines gebrauchten Produkts bis zu einem definierten, in der Regel niedrigeren Qualitätsniveau

[20] Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016), S. 133.

[21] In Anlehnung an Lange, U. (2017), S. 9 & Steinhilper (1998) in Lindahl, M.; Sundin, E. und Östlin, J. (2006), S. 448.

[22] Lange, U. (2017), S. 9.

als bei einem Neuprodukt. Das Upgrading oder die Modernisierung verbessern die Funktion, Leistung oder Sicherheit durch Aufrüstung eines Ausgangsprodukts. Die Grenzen zwischen Remanufacturing, Refurbishing und Upgrading verlaufen fließend, oftmals sind diese kombiniert anzutreffen. Eine klarere Abgrenzung zum Remanufacturing, Refurbishing und Upgrading stellt die Reparatur oder Instandhaltung bzw. -setzung dar. Sie führt lediglich defekte Produkte in ihren Sollzustand zurück und verlängert dadurch die Nutzungsdauer, muss aber nicht zwingend ein Teil der Kreislaufführung sein[23].

Das Remanufacturing erfolgt gewöhnlich durch mehrere Prozessschritte. Die wiederaufgearbeiteten Produktteile werden ihrer ursprünglichen Funktion erneut zugeführt. Die Produktqualität wiederaufgearbeiteter Produktteile ist gleich- oder höherwertiger als die eines Neuprodukts. Um sicherzustellen, dass die wiederaufgearbeiteten Altprodukte der Qualität und Garantie der Neuprodukte entsprechen, werden vergleichbare Qualitätssicherungsmaßnahmen wie bei neuen Produkten durchgeführt[24].

Um einen Wandel hin zur Kreislaufwirtschaft zu beschleunigen, berücksichtigt das Remanufacturing als Option der Kreislauwirtschaft alle Aspekte und Hinweise des Kreislaufwirtschaftskonzeptes und folgt dessen Vorschlägen. Es reicht nicht aus, lediglich Anpassungen an einem linearen Produktlebensweg vorzunehmen und negative Auswirkungen der linearen Wirtschaft zu verringern. Vielmehr ist ein umfassendes und systematisches Konzept erforderlich. Das Wirtschaftssystem muss auf allen Ebenen effektiv arbeiten. In diesem Zusammenhang stehen nach Ellen MacArthur[25] die vier Bereiche bzw. Bausteine einer Kreislaufwirtschaft (engl. building blocks) im Vordergrund (vgl. Abbildung 5). Während sich die Bereiche Design sowie Sammel- und Rücknahmesysteme auf technische Aspekte und Randbedingungen beziehen, befassen sich die beiden Bereiche innovative Geschäftsmodelle sowie interne und externe Bedingungen mit ökonomischen, rechtlichen, kulturellen und gesellschaftlichen Aspekten.

[23] Vgl. Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J. und Westkämper, E. (2009), S. 273 – 293.
[24] Vgl. Lange, U. (2017), S. 18 ff.
[25] Vgl. Ellen MacArthur Foundation (2017).

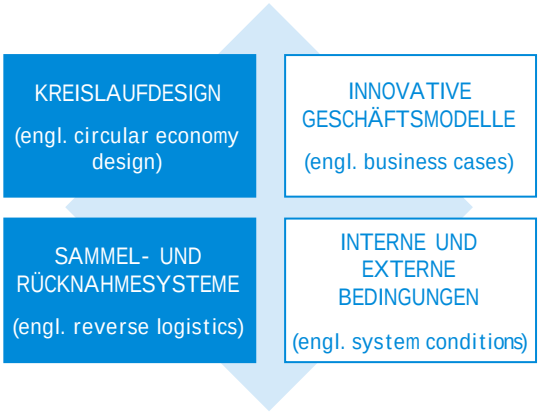

Abbildung 5: Bausteine einer Kreislaufwirtschaft[26]

Kreislaufdesign erfordert innovative Arbeitsmethoden und fortgeschrittene Kenntnisse hinsichtlich wichtiger Produkt- und Produktionsaspekte wie z. B. Materialauswahl, standardisierter Komponenten, auf Langlebigkeit ausgelegter Produkte, Wiederverwendung von Materialien und Produkten.

Kosteneffiziente, qualitativ hochwertige Sammel- und Rücknahmesysteme sowie eine effektive Segmentierung von Altprodukten verringern Materialverluste aus dem System und reduzieren die Entnahme neuer Rohstoffe aus der Umwelt. Dazu gehören auch Mechanismen wie Sortierungs- und Logistiksysteme, Lagerung und Risikomanagement[27].

Innovative Geschäftsmodelle tragen nicht nur zur Profitabilität und Nachhaltigkeit der einzelnen Akteure bei, sondern inspirieren auch andere Unternehmen. Als Folge werden sich die neuen Modelle geografisch ausweiten und einen Wandel zur Kreislaufwirtschaft unterstützen.

Darüber hinaus spielen interne und externe Bedingungen eine zentrale Rolle. Neben rechtlichen Randbedingungen und gesellschaftlichen Anforderungen bestimmen Aspekte der Marktakzeptanz maßgeblich den Wandel

[26] In Anlehnung an Ellen MacArthur Foundation (2017).

[27] Vgl. VDI 2243:2002-07, VDI 2343 Blatt 1:2001-05, VDI 2343 Blatt 2:201002, VDI 2343 Blatt 3:2009-04, VDI 2343 Blatt 4:2012-01, VDI 2343 Blatt 5:2013-04, VDI 2343 Blatt 6:2019-02 und VDI 2343 Blatt 7:2013-04.

hin zur Kreislaufwirtschaft. Dies erfordert aber auch Akzeptanz und Unterstützung von politischen Entscheidungsträgern, Forschungs- und Bildungseinrichtungen, Medien sowie von der Bevölkerung selbst. Vorschläge zur Motivation sind z. B. Aufklärungsarbeit sowie neue Kooperationen, die Anreize für Unternehmen und Kunden schaffen. Aber auch intern in Unternehmen selbst sind geeignete Randbedingungen Voraussetzung oder müssen geschaffen werden. So müssen z. B. innovatives Denken und Kreativität innerhalb des Unternehmens nicht nur erlaubt, sondern auch gefördert werden, auch wenn die Ergebnisse daraus oftmals entgegen der Konventionen des linearen Wirtschaftens laufen.

Eine gut funktionierende Kreislaufwirtschaft und somit auch das Remanufacturing sind nur dann möglich, wenn Aspekte aus allen vier Bereichen berücksichtigt werden. Eine Herausforderung stellt dabei die Tatsache dar, dass die vier Blöcke keine klaren Abgrenzungen zueinander haben und zusätzlich gegenseitige, oftmals gegenläufige Wechselwirkungen zueinander aufweisen. So können technische Maßnahmen ihren Wert nur in Zusammenhang mit einem darauf ausgerichteten Geschäftsmodell entfalten. Technische Aspekte der Rückführlogistik (engl. Reverse Logistics) finden sich ebenfalls im Produktdesign. Auch Mitarbeiter müssen über Geschäftsmodelle nachdenken dürfen, die eventuell den Markt von bisher hergestellten Neuprodukten kannibalisieren, und dies vor dem Hintergrund, dass gesetzliche Randbedingungen neue, zirkuläre Geschäftsausrichtungen manchmal verhindern[28].

2.1.2 Prozessschritte und technische Aspekte

Der Prozess des Remanufacturing unterteilt sich im Wesentlichen in fünf Hauptprozessschritte, die in Abbildung 6 schematisch dargestellt sind.

Das aufzuarbeitende Altprodukt bestimmt den Ablauf einzelner Prozessschritte. Mechanische, elektrische, elektromechanische und hydraulische Systeme werden häufig direkt demontiert und den Prozessschritten der Reinigung, Prüfung, Aufarbeitung und Remontage zugeführt. Bei mechatroni-

[28] Vgl. Technopolis Group (2016), S. 10 – 16 und S. 56 – 58.

schen, elektronischen und hybriden Systemen werden Altteile meistens zuerst einer Eingangsfunktionsprüfung unterzogen, bevor Altprodukte in die Demontage gegeben werden[29].

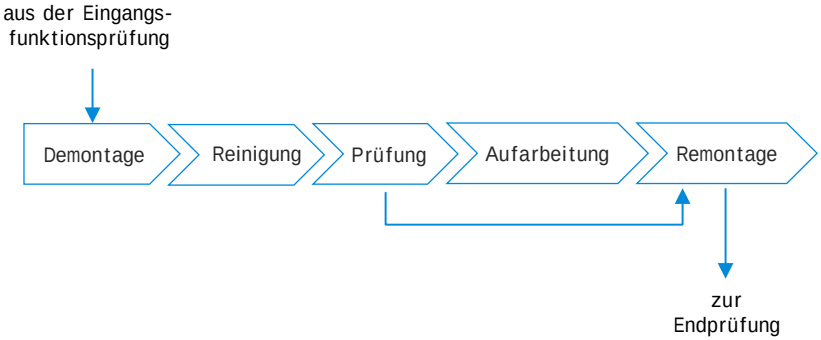

Abbildung 6: Hauptprozessschritte des Remanufacturing[30]

Bei der Demontage werden Altteile in einzelne Bestandteile zerlegt und sortiert. Dabei bestimmt die Demontierbarkeit der Produkte die Art der Demontage, beispielsweise eine zerstörende oder zerstörungsfreie Demontage. In beiden Fällen dient der Prozess der Separierung von Bauteilen, Modulen, Baugruppen, Einzelstoffen oder Stoffgemischen. Ziel dabei ist entweder die gezielte Entnahme unerwünschter Module, um die restlichen Teile aufarbeiten zu können, oder die Vereinzelung von Modulen und Einheiten, um besser reinigen, aufarbeiten, aufbereiten oder weiterbehandeln und austauschen zu können[31]. Nicht wiederverwendbare Produkteinheiten müssen identifiziert werden. Diese Teile werden aus der Prozesskette entfernt und zumindest einer angemessenen Verwertung zugeführt. Die Demontage unterscheidet sich grundsätzlich von der Montage mit ihrer planbaren Fertigung von Produktmengen durch ein schwer kalkulierbares Mengenaufkommen, eine große Vielfalt an Altgeräten, unsichere Altgerätezustände, wie z. B. Verschmutzungen, Beschädigungen, Rost, fremde Ersatzteile, sowie durch unterschiedliche, nicht immer demontagefreundliche Altgerätestruk-

[29] Vgl. Lange, U. (2017), S. 18 f. & Freiberger, S. (2007).
[30] In Anlehnung an Lange, U. (2017), S. 18 & Steinhilper, R. (1999).
[31] VDI 2343 Blatt 3:2009-04.

turen. Weitere wichtige Themen sind manuelle, teilautomatisierte oder vollautomatische Demontage, Werkzeuge, Betriebsstoffhandhabung, Demontagetiefe oder Arbeitsplatzgestaltung einschließlich Planung, Ablauf und Organisation[32].

Die demontierten und für eine Aufarbeitung geeigneten Altteile werden in der nachfolgenden Reinigungsstufe entfettet, entölt, entrostet oder entlackt. Nach der Reinigung werden die Teile erneut geprüft und gemäß ihren Mängeln als wiederverwendbar mit oder ohne Aufarbeitungsbedarf oder als nicht wiederverwendbar eingestuft. Teile, die keine Aufarbeitung benötigen, werden direkt der Remontage zugeführt. Nicht wiederverwendbare Teile werden gegen neue Ersatzteile ausgetauscht.

Andere Altteile werden mithilfe von Verfahren, die bereits für die Prozessgestaltung festgelegt sind, aufgearbeitet, geprüft und anschließend in der Remontage für die Herstellung eines aufgearbeiteten Produkts verwendet. Wenn die Altteile durch den Originalgerätehersteller aufgearbeitet werden, findet die Remontage teilweise auf den Neufertigungslinien statt.

Die Endprüfung dient der Kontrolle der Leistungs- bzw. Funktionsfähigkeit und stellt sicher, dass diese auf gleichem oder höherem Niveau eines Neuprodukts liegen. Im Unterschied zu Neuproduktionen werden Qualitätssicherungsmaßnahmen bei jedem aufgearbeiteten Produkt durchgeführt[33].

Neben dem Ablauf und der technischen Gestaltung der einzelnen Prozessschritte ist die Wahl der für eine Kreislaufführung geeigneten Materialien sehr wichtig. Die Materialien müssen so gewählt und verwendet werden, dass Produkte am Ende ihres Lebenswegs einfach zerlegt und auf gleicher Qualitätsstufe wie Neuprodukte aufgearbeitet werden können. Dieser technische Aspekt ist für das Remanufacturing von sehr großer Bedeutung und soll bereits bei der Entwicklung des Produkt- und Prozessdesigns berücksichtigt werden.

Voraussetzung für ein erfolgreiches Remanufacturing ist die Identifikation von Materialien und ggf. Verfügbarkeit vollständiger Materialdeklarationen.

---

[32] **VDI 2343 Blatt 3:2009-04.**

[33] **Vgl. Lange, U. (2017), S. 20 f.**

Letztere dienen hauptsächlich der Informationsbereitstellung während der Entsorgungsphase inklusive der Rücknahme zur Kreislaufführung hinsichtlich stofflicher Verwertbarkeit und Verwertungskompatibilität. Dennoch wird auch beim Remanufacturing Ausschuss entstehen, der wiederum optimal einem stofflichen Recycling zugeführt werden sollte. Daneben sind die Informationen zu umweltkritischen Stoffen, Schadstoffen, toxischen Stoffen und sonstigen Stoffen mit gefährlichen und gefährdenden Eigenschaften wesentlich für ein bedarfsgerechtes Handling im Remanufacturing-Prozess. Dies gilt für die Handhabung direkt wie auch für den möglichen Einsatz zur weiteren Verwendung aufgearbeiteter Einzelteile, Module oder Gesamtprodukte. Je nach Produktart schließt dies Betriebsstoffe ebenfalls mit ein. Diese sind jedoch auch unter dem Gesichtspunkt der Demontierbarkeit und einfachen Entnahmemöglichkeit zu erwähnen.

Eine große Bedeutung für die Kreislaufführung von Altteilen hat die Rücknahmelogistik. Sie ist integraler Teil eines Kreislaufdesigns bzw. des Geschäftsmodells und eng mit den rechtlichen Randbedingungen verknüpft (vgl. Kapitel 2.1.3). Jedoch basiert auch die Rücknahmelogistik auf technischen Aspekten, da konstante Mengen von Altprodukten in möglichst gleichbleibender Qualität kontinuierlich bereitgestellt werden müssen[34].

Die Wahl geeigneter Materialien stellt eine technische Fragestellung dar und erfolgt neben den üblichen preis- und qualitätsrelevanten Kriterien auch unter Berücksichtigung möglicher Geschäftsmodelle innerhalb einer oder für eine Kreislaufwirtschaft (vgl. Kapitel 2.1.3). Höchst unwahrscheinlich wird ein Unternehmen ein höherwertiges, eventuell teureres Material ohne technische Notwendigkeit einsetzen, nur um eine Kreislauffähigkeit durch die Erhaltung entsprechend hoher Materialwerte zu erzeugen. Demgegenüber beeinflussen die Rücknahmelogistik und die jeweils vorliegende Materialsituation signifikant die Nachhaltigkeit von Geschäftsmodellen. Hinsichtlich der Sammlung und Erzeugung sinnvoller Stoff- und Produktströme kann das gesamte Logistiksystem sehr aufwendig werden. Dagegen prägt die Demontage sowohl technische Bedingungen als auch Geschäftsmodelle. Zum einen entscheidet sie über die technische Zugänglichkeit zu Produktmodulen. Zum

[34] **VDI 2343 Blatt 2:2010-02.**

anderen determiniert sie den Aufwand und die Kosten gegenüber der erzeugten oder erzeugbaren Wertschöpfung.

Um eine Abwägung im Entwicklungsprozess eines Produkts zu treffen, sind Bewertungsindikatoren hilfreich. Die Indikatoren müssen den gesamten Lebensweg eines Produkts bewerten können, um das Gesamtbild zu erfassen und zu verbessern und sich nicht nur auf einzelne Abschnitte des Lebenswegs bezogene Vorteile zu konzentrieren. Geläufige Indikatoren basieren auf der Methode der Ökobilanz und der Kostenrechnung über den Produktlebensweg (vgl. Kapitel 3).

2.1.3 Geschäftsmodelle und weitere Aspekte

Zirkuläre Geschäftsmodelle berücksichtigen Kreislaufdesign-Prinzipien und legen einen großen Wert auf die Verbindung des effizienten Einsatzes von Ressourcen mit dem Geschäftserfolg von Unternehmen.

Die Anforderungen an das Kreislaufdesign führen zu einer Auseinandersetzung mit dem Produkt und den Materialien. Damit fördern sie die Innovation in Form von Design- und Prozessanpassungen, welche u. a. auch mögliche Technologieführerschaft, Agilität und die Wettbewerbsfähigkeit begünstigen. Unternehmen können beispielsweise über ein intelligentes Produktdesign und ein gut funktionierendes Rücknahmesystem nicht nur Material- und Produktionskosten verringern, sondern auch die Umwelt schonen. Innovative Geschäftsmodelle sind flexibel, proaktiv und integrieren die Teile der Wertschöpfungskette.

Um ein nachhaltiges Remanufacturing zu gestalten, beschäftigen sich neue Geschäftsmodelle verstärkt mit den Bereichen der Rücknahmelogistik für gebrauchte Teile, dem Remanufacturing-Prozess und der Vermarktung von aufgearbeiteten Produkten (vgl. Abbildung 7). Die Geschäftsmodelle müssen gewährleisten, dass sich die Kosten für das Remanufacturing auch für den Hersteller in irgendeiner Form auszahlen. Dies geschieht nur über effizientere, besser kontrollierte, ganzheitliche und von Anfang an gut geplante Prozesse.

Eine wichtige Grundlage ist eine gut funktionierende Rücknahmelogistik. Hierzu sind qualifizierte Sammel- und Rücknahmesysteme inklusive der Erkennung, Lagerung und Sortierung sowie Transporte zwischen allen Akteuren der Entsorgung erforderlich. In diesem Zusammenhang müssen Nachweispflichten, rechtliche Bestimmungen und gewerbliche bzw. privat genutzte Produkte sowie kommunale, gesetzliche oder freiwillige Sammelsysteme, gemeinsam oder individuell organisiert, mit Bring- oder Abholsystem berücksichtigt werden.

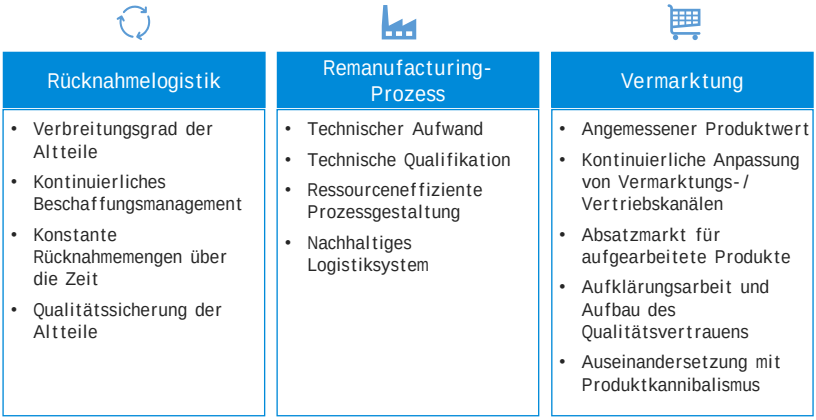

Abbildung 7: Geschäftsbereiche und Aspekte des Remanufacturing[35]

Aktuell existieren mehrere Rücknahmemodelle für Altteile[36]. Bei eigentumsbasierter Rücknahme bleibt das Eigentum des Produkts während der Nutzung durch Kunden durchgängig beim Hersteller. Darüber hinaus können die gebrauchten Produkte aufgrund eines zwischen Hersteller und Kunden abgeschlossenen Servicevertrags mit einer inkludierten Aufarbeitung zurückgenommen werden. Im Weiteren können gebrauchte Produkte von Kunden direkt an den Remanufacturing-Betrieb mit einem Aufarbeitungsauftrag im Rahmen einer Auftragsinstandsetzung abgegeben werden. Der Kunde bekommt dasselbe aufgearbeitete Produkt wieder zurück. Bei einer 1:1-Rücknahme verpflichtet sich der Kunde, beim Kauf eines aufgearbeiteten Produkts ein gleiches, gebrauchtes Produkt zurückzugeben. Die Rücknahme

[35] In Anlehnung an Guide, V. D. R. und Wassenhove, L. N. V. (2009), S. 10 – 18.
[36] Vgl. Lange, U. (2017), S. 25.

kann über Rabatte auf aufgearbeitete Produkte erfolgen. Bei der Rückgabe eines gebrauchten Produkts bekommt der Kunde einen Rabatt, der als Preisnachlass auf den Kauf der aufgearbeiteten Produkte dient.

Um aufgearbeitete Produkte zu einem angemessenen Preis anbieten zu können, muss eine konstant ausreichende Menge von Altteilen über einen Zeitraum mit möglichst gleichbleibender, hoher Qualität bereitgehalten werden. Dieser Aspekt ist in hohem Maß von der Verbreitung des Produkts auf dem Markt abhängig. Geringe Produktmengen auf dem Markt erschweren die Rücknahmelogistik und sehr große Marktangebote von Neuprodukten senken die Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten[37].

Der Remanufacturing-Prozess muss technologisch so angepasst werden, dass er sich wirtschaftlich darstellt, z. B. bezogen auf die Detailtiefe der Aufarbeitung oder den Umfang aller möglichen auszutauschenden Einzelteile. Die Kosten für den technischen Aufwand sollten die Einnahmen durch den Verkauf der aufgearbeiteten Produkte nicht übersteigen. Überprüfungen der Altteile erfordern eine ausreichende Qualifikation des Personals, da sie in der Regel durch manuelle Sichtdiagnosen durchgeführt werden.

Damit es eine Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten gibt, müssen diese einen hohen Produktwert besitzen. Die Vermarktungs- und Vertriebskanäle, über die die Produkte angeboten werden, sind kontinuierlich an die Anforderungen der Kunden und die Marktsituation anzupassen. Von großer Bedeutung ist ein etablierter Absatzmarkt für reparierte, wiederverwendbare und aufgearbeitete Produkte. Für Kunden ist es teilweise schwierig, aufgearbeitete Komponenten als Teile mit gleicher Qualität wie Neuprodukte zu sehen und ihnen zu vertrauen. Das Qualitätsvertrauen ist deshalb zentral für die Marktnachfrage. Um Kunden zu gewinnen, sollten Unternehmen viel in die Aufklärungsarbeit investieren. Darüber hinaus muss einem möglichen Produktkannibalismus vorgebeugt werden, damit aufgearbeitete Produkte nicht zulasten des Absatzes neugefertigter Produkte gehen. Oftmals stehen hier Unternehmenseinheiten zur Neufertigung und Aufarbeitung von Produkten im Wettbewerb. Solange die Neufertigung jedoch den Kernbereich des Unternehmens ausmacht, wird es kaum unternehmerisches Ziel sein,

[37] Vgl. Lange, U. (2017), S. 26 ff.

diesen zu schmälern, sodass Remanufacturing als Risiko für den Absatzmarkt angesehen wird.

Alle diese Aspekte sind immer unter den jeweiligen gesetzlichen Rahmenbedingungen und gesellschaftlichen Anforderungen im Hinblick auf einen effizienten Ressourceneinsatz und die Erkenntnis über Potenziale einer wirtschaftlichen Wiederverwendung von Altprodukten zu betrachten. Dadurch entwickeln sich Geschäftsmodelle langfristig in Richtung einer Kreislaufwirtschaft, auch wenn kurzfristig durch manche gesetzlichen Forderungen Barrieren festzustellen sind[38]. Aber es ist auch eine kontinuierliche Anpassung der Gesetze zur Motivation von Kreislaufwirtschaft festzustellen. Um nur ein Beispiel zu nennen ist „ ... am 4. Juli 2018 das EU-Legislativpaket zur Kreislaufwirtschaft in Kraft getreten. Gegenstand des Legislativpaketes sind Novellierungen der wesentlichen abfallrechtlichen Regelungen. Dazu zählen neben der Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle) auch die Verpackungsrichtlinie, die Elektroaltgeräterichtlinie, die Batterierichtlinie, die Altfahrzeugrichtlinie und die Deponierichtlinie“[39]. Insbesondere ist der Programmentwurf „European Green Deal“[40] der Europäischen Kommission hervorzuheben. Dieses Dokument legt im Kern ein kohlenstoffneutrales Europa bis 2050 fest und fordert und fördert in diesem Zusammenhang u. a. Lebenszyklusdenken, Kreislaufwirtschaft, entsprechende Produktkennzeichnungen sowie Zulassungen und Beschränkungen von Produkten. Der European Green Deal konkretisiert Gesetze und Regulierungen auf europäischer und nationaler Ebene, mit denen ab 2021 zu rechnen ist.

2.2 Marktrelevanz und Markttrends

Eine letzte systematische Marktdatenerhebung für Remanufacturing-Branchen fand im Rahmen einer europäischen Marktstudie im Jahr 2015 statt[41]. Für die nachfolgenden Jahre liegen keine Erhebungen von Marktdaten vor, was eine Expertenbefragung an Frau Waugh[42] bestätigte.

[38] Vgl. Technopolis Group (2016), S. 10 –16 und S. 56 – 58.

[39] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020), S. 1.

[40] Vgl. Europäische Kommission (2020).

[41] Vgl. Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, K.; Ramkumar, S. und Peck, D. (2015).

[42] Waugh, R. (2020).

Um die Entwicklung des Remanufacturing-Marktes bewerten zu können, wurden Daten aus der Datenbank des Statistischen Amtes der Europäischen Union (Eurostat) verwendet[43]. In der Eurostat-Datenbank lagen Informationen zur Marktentwicklung der übergeordneten Sektoren für die Jahre 2015 bis 2017 vor. Die Basisdaten für das Jahr 2015 aus der Marktstudie des European Remanufacturing Networks (ERN)[44] wurden mit den Daten aus der Eurostat-Datenbank verknüpft und ihre Entwicklung in nachfolgenden Jahren wurde aufgrund der jährlichen Veränderung der Eurostat-Daten berechnet[45]. Dazu wurden absolute Werte aus der ERN-Studie mit den jährlichen Veränderungen der Sektoren aus Eurostat extrapoliert.

Die Entwicklung des deutschen Remanufacturing-Marktes ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Tabelle zeigt lediglich den Remanufacturing-Markt, nicht die übergeordneten Sektoren. Im Zeitraum von 2015 bis 2017 wuchs der Remanufacturing-Markt in Deutschland um insgesamt rund 17 % auf mehr als 10 Mrd. Euro. Im Luftfahrt- und Automotive-Sektor kam es in zwei Jahren zu einem starken Umsatzwachstum von rund 20 %. Auch im Bereich des Maschinenbaus, der Medizintechnik und des Schienenverkehrs stieg der Umsatz deutlich. In den anderen Sektoren fiel das Wachstum hingegen schwächer aus.

[43] Eurostat SBS (2020).

[44] Vgl. Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, K.; Ramkumar, S. und Peck, D. (2015), S. 42 – 51.

[45] Eurostat SBS (2020).

Tabelle 1: Umsatzentwicklung im deutschen Remanufacturing-Markt 2015 – 2017[46]

Branche	Umsatz in Million Euro		
	2015	2016	2017
Luftfahrt	3.814	3.940	4.595
Automotive & Schwerlast	3.478	3.573	4.117
Elektrisches und elektronisches Equipment	646	581	647
Maschinenbau	336	348	368
Medizintechnik	316	329	344
Schienenverkehr	61	63	72
Möbel	66	71	70
Schiffsbau	11	12	13
Gesamt	**8.728**	**8.917**	**10.226**

Die Verteilung des Gesamtumsatzes auf die Branchen verdeutlicht Abbildung 8. Sie basiert auf Tabelle 1. Im Jahr 2017 wurden insgesamt rund 98 % der Umsätze in den Branchen Luftfahrt, Automotive & Schwerlast, elektrisches und elektronisches Equipment (EEE), Maschinenbau sowie Medizintechnik erzielt. Dabei sind die Sektoren Luftfahrt mit 45 % und Automotive & Schwerlast mit 40 % besonders hervorzuheben.

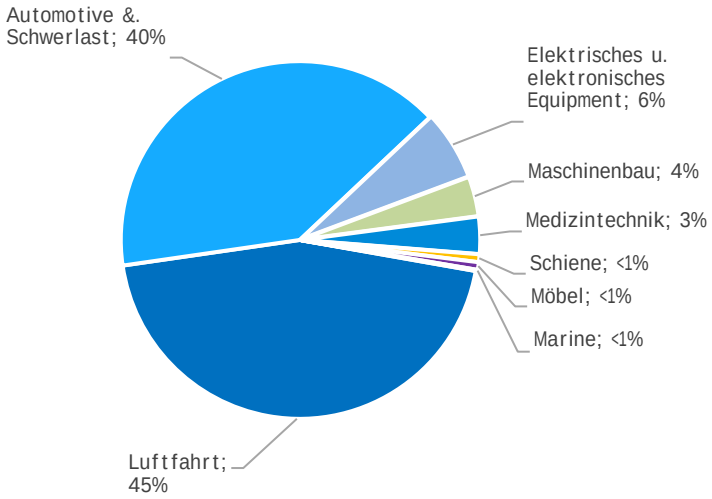

Abbildung 8: Umsatz der Remanufacturing-Branche in Deutschland im Jahr 2017

[46] Eigene Berechnung aus Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, K.; Ramkumar, S. und Peck, D. (2015), S. 44 & Eurostat SBS (2020).

Diese Verhältnisse spiegeln sich auch in den Mitarbeiterzahlen wider (vgl. Tabelle 2). Deren Zahlen wurden im vergleichbaren Vorgehen wie für die Umsatzzahlen basierend auf Eurostat[47] und der ERN-Studie[48] berechnet. Ein Großteil der Beschäftigten ist in den Bereichen Luftfahrt und Automotive angestellt, gefolgt von EEE, Medizintechnik und Maschinenbau. Mit mehr als 43.000 Mitarbeitern und über 10 Mrd. Euro Umsatz (Stand 2017) stellt das Remanufacturing einen wichtigen und weiter wachsenden Teil der deutschen Industrie dar.

Tabelle 2: Mitarbeiter in der deutschen Remanufacturing-Industrie 2015 – 2017[49]

Branche	Anzahl der Mitarbeiter		
	2015	2016	2017
Luftfahrt	17.370	17.785	18.507
Automotive & Schwerlast	16.820	15.322	16.025
Elektrisches und elektronisches Equipment	4.040	4.024	4.372
Maschinenbau	1.630	1.651	1.695
Medizintechnik	2.030	2.099	2.126
Schienenverkehr	350	319	333
Möbel	550	573	556
Schiffsbau	70	81	94
Gesamt	**42.860**	**41.855**	**43.708**

Auch wenn die Umsätze jetzt schon hoch sind, ist das Wachstumspotenzial des Remanufacturing in Deutschland weiterhin sehr groß. Die Wiederaufarbeitung von Produkten und Produktteilen ist für produzierende Unternehmen aus der Automobil-, Luftfahrt-, Elektronik- und Medizintechnikbranche äußerst relevant. Auch in weiteren Bereichen wie beispielsweise dem Schienenverkehr, dem Schiffsbau sowie der Möbelindustrie spielt Remanufacturing eine Rolle, wenn auch in geringerem Umfang als in den zuvor genannten Sektoren.

[47] Eurostat SBS (2020).

[48] Vgl. Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, K.; Ramkumar, S. und Peck, D. (2015), S. 47.

[49] Eigene Berechnung aus Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, K.; Ramkumar, S. und Peck, D. (2015), S. 47 & Eurostat SBS (2020).

3 BEWERTUNG VON PRODUKTGRUPPEN FÜR DAS REMANUFACTURING

3.1 Bewertungssystem

3.1.1 Auswahl der Bewertungsaspekte

Zahlreiche Beispiele aus verschiedenen Industriebranchen zeigen die möglichen ökonomischen und ökologischen Vorteile des Remanufacturing deutlich[50]. Jedoch können manche Produkte besser als andere für das Remanufacturing verwendet werden.

Um zu bestimmen, welche Produktgruppen für das Remanufacturing geeignet sind, ist ein einheitliches Bewertungssystem notwendig. Jedes Produkt soll in Bezug auf relevante Kriterien untersucht werden.

Aus diesem Grund wird in dieser Studie ein neues Bewertungssystem in Form einer Bewertungsmatrix entwickelt. Diese Matrix erlaubt es, Produkte hinsichtlich 34 Kriterien (vgl. Kapitel 3.1.2) zu bewerten. Diese Kriterien charakterisieren Produktdesign, Sammel- und Logistiksysteme, Geschäftsmodelle und sonstige Aspekte.

3.1.2 Entwicklung einer Bewertungsmatrix

Die Entwicklung der Matrix fand in Anlehnung an die VDI 2243 (Recyclingorientierte Produktentwicklung)[51] und VDI 2343 Blatt 1 bis Blatt 7 (Recycling elektrischer und elektronischer Geräte)[52] statt sowie unter Berücksichtigung der vier Bausteine nach Ellen MacArthur Foundation[53]. Die Bewertungsmatrix dient als Grundlage für eine systematische Produktbewertung in Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft.

---

[50] Vgl. Bindel, R. (2017) & Buchberger, S.; Hofbauer, G.; Mangold, L. und Truong, K. (2019) & Grepper, Y. (2018) & Ionaşcu, I. und Ionaşcu, M. (2018) & Lange, U. (2017) & Liebherr (2020) & Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, K.; Ramkumar, S. und Peck, D. (2015) & Scheelhaase, T. und Zinke, G. (2016) & Technopolis Group (2016) & VDI e.V. (2019).

[51] VDI 2243:2002-07.

[52] VDI 2343 Blatt 1:200105, VDI 2343 Blatt 2:2010-02, VDI 2343 Blatt 3:2009-04, VDI 2343 Blatt 4:2012-01, VDI 2343 Blatt 5:2013-04, VDI 2343 Blatt 6:2019-02 und VDI 2343 Blatt 7:2013-04.

[53] Ellen MacArthur Foundation (2017).

Die Bewertungsmatrix beinhaltet 34 Bewertungskriterien, die in vier Hauptkategorien unterteilt werden können:

- technische Aspekte und Design,
- technische Aspekte reverse Logistik,
- Geschäftsmodell,
- weitere Aspekte.

Ziel ist dabei eine ganzheitliche Bewertung des Potenzials von Produkten für das Remanufacturing. In diesem Zusammenhang werden nicht nur einzelne Aspekte wie beispielsweise das Geschäftsmodell bewertet, sondern es wird ein umfassender Kriterienkatalog, welcher die Aspekte Produkt und Markt sowie gesetzliche und ökonomische Rahmenbedingungen abdeckt, entwickelt. Viele der Kriterien bedingen sich gegenseitig und sind in ihrer Summe für das Remanufacturing von Produkten relevant. Die Bewertungsmatrix dient der systematischen Identifikation von fördernden und hemmenden Aspekten für ein Remanufacturing. Dadurch kann systematisch an der Auflösung hemmender Aspekte gearbeitet und somit das Potenzial von Produkten für ein Remanufacturing gesteigert werden.

In jeder der Hauptkategorien wird der Beitrag einzelner Aspekte zum Remanufacturing untersucht.

In der Kategorie „Technische Aspekte und Design“ (vgl. Tabelle 3) werden Produkte hinsichtlich der eingesetzten Materialien und Modularität beurteilt. Diese Kategorie enthält insgesamt zehn Bewertungsaspekte (TAD-01 bis TAD-10). Diese Kriterien bewerten die Identifikation und das Handling von Materialien sowie die Modularität des Produkts für eine vollständige oder teilweise Wiederverwendung bzw. Aufarbeitung.

Tabelle 3: Übersicht technischer Aspekte und Design

Technische Aspekte & Design	
Materialien	
TAD-01	Materialdeklarationen verfügbar/Identifikation von Materialien leicht möglich
TAD-02	Identifikation von Modulen leicht möglich
TAD-03	Gefährliche/toxische Stoffe (bei Handling, Gefährdung von Mitarbeitern)
TAD-04	Umweltkritische und gefährliche Stoffe (ggf. mit gesetzlicher Restriktion bei Wiederinverkehrbringung)
Modularität und Langlebigkeit	
TAD-05	Gesamtprodukt wiederverwendbar – effizienter Ausbau und Austausch von nicht wiederverwendbaren Modulen
TAD-06	Gesamtprodukt nicht wiederverwendbar – effiziente Entnahme wiederverwendbarer Einzelteile
TAD-07	Hoher Standardisierungsgrad der Demontage
TAD-08	Hoher Automatisierungsgrad der Demontage
TAD-09	Langlebigkeit von Bauteilen und Modulen
TAD-10	Updatefähigkeit/Kompatibilität zu neuen Produktgenerationen

In der Kategorie „Technische Aspekte reverse Logistik“ (vgl. Tabelle 4) werden zwölf Kriterien zur Identifikation (Produkt, Material, Alter etc.), zu Sammel- und Lagerungssystemen sowie zur Sortierbarkeit und Standardisierung der Module abgefragt (TAL-01 bis TAL-12).

Tabelle 4: Übersicht technischer Aspekte und reverser Logistik

Technische Aspekte reverser Logistik	
Identifikation (Produkt, Alter etc.)	
TAL-01	Information zum Verbleib des Produkts/Verfügbarkeit für Rückführung
TAL-02	Eindeutige Produktzuordnung
TAL-03	Materialien klar identifizierbar (falls keine Materialdeklaration)
TAL-04	Alter und Zustand identifizierbar (technisch/Dokumentation)
Sammlung & Rückführung	
TAL-05	Geringer Transportaufwand je Produkteinheit
TAL-06	Hoher Wert im Verhältnis zum Sammlungsaufwand
TAL-07	Etabliertes, funktionierendes Sammel-/Rückführsystem
TAL-08	Gesetzliche Vorgaben zur Sammlung und Rückführung
Lagerung	
TAL-09	Gute Lagerfähigkeit
TAL-10	Planbarer Lagerbestand (Wareneingang/-ausgang)
TAL-11	Gute Sortierbarkeit ausgebauter Module
TAL-12	Hohe Standardisierung der Module

Die Kategorie „Geschäftsmodell“ (vgl. Tabelle 5) beinhaltet eine Bewertung hinsichtlich der Rücknahmemengen, Rahmenbedingungen wie Gesetze oder Vorgaben, Marktakzeptanz und des Absatzmarktes. Insgesamt werden hier acht Aspekte abgefragt (GEM-01 bis GEM-08).

Tabelle 5: Übersicht der Geschäftsmodelle

Geschäftsmodelle	
GEM-01	Konstante und planbare Rücknahmemengen
GEM-02	Konstanter und planbarer Absatzmarkt
GEM-03	Etabliertes und verlässliches Rücknahmesystem hinsichtlich Rücknahme- und Absatzmenge (lebenszyklusübergreifende Produktverantwortung)
GEM-04	Strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben) des Rücknahmemarktes
GEM-05	Strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben) des Absatzmarktes, wie z. B. Zulassungskriterien
GEM-06	Marktakzeptanz aufgearbeiteter Produkte
GEM-07	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch Neuprodukte
GEM-08	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch andere aufgearbeitete Produkte

Als weitere Bewertungsaspekte (vgl. Tabelle 6) dienen mögliche Risiken wie Sicherheits-, Ausfall- und Markenrisiken sowie Wertwahrnehmung der aufgearbeiteten Produkte und Verfügbarkeit des qualifizierten Personals. Insgesamt enthält diese Kategorie vier Bewertungskriterien (OTH-01 bis OTH-04).

Tabelle 6: Übersicht der weiteren Aspekte

Weitere Aspekte	
OTH-01	Sicherheits- oder Ausfallrisiko durch aufgearbeitete Produkte
OTH-02	Markenrisiko (bei vorzeitigem Ausfall aufgearbeiteter Produkte)/Branding als aufgearbeitetes Produkt (B2C) (Qualitätswahrnehmung) [falls relevant]
OTH-03	Wertwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte (Qualität von Up-, Down- und Recycling)
OTH-04	Gutes Angebot an qualifizierten Mitarbeitern

In der Bewertungsmatrix werden alle Informationen in einer Übersicht quantitativ erfasst und qualitativ in Textform sowie mit einem Farbcode markiert dokumentiert. Die quantitative Bewertung erfolgt mittels einer Skala in ganzzahligen Schritten von +2 bis –2. Ist ein Aspekt, z. B. die Identifikation von verwendeten Materialien bzw. das Vorhandensein einer Materialdeklaration, förderlich, erfolgt eine Bewertung mit +1 oder +2 je nach Intensität des Aspekts. Sind die benötigten Informationen nicht verfügbar oder ist ein

Aspekt für die Eignung für ein Remanufacturing hinderlich, erfolgt die Bewertung mit -1 oder –2 je nach Intensität des Aspekts. Zusätzlich zur quantitativen Bewertung gibt es für jedes Kriterium ein Textfeld, in welchem erläuternde und ergänzende Kommentare eingetragen werden. Förderliche Aspekte werden dabei grün dargestellt, hinderliche Aspekte rot und neutrale gelb.

Eine Gewichtung der Kriterien ist möglich, findet aber derzeit nicht statt. Auch wird auf die Definition eines Schwellenwertes verzichtet, ab welchem das Remanufacturing-Potenzial als grundsätzlich positiv (bzw. negativ) interpretiert wird. Eine Ausarbeitung von Gewichtungsfaktoren und Schwellenwerten könnte zukünftig im Rahmen einer Fallstudie mit einer größeren Anzahl von Produktbeispielen erfolgen.

Die Bewertungsmatrix dient Unternehmen dazu, Produkte spezifisch auf ihre Eignung zum Remanufacturing hin zu untersuchen. Durch die strukturierte Abfrage von Kriterien erfolgen eine systematische Bewertung und Identifikation von fördernden und hemmenden Faktoren für das Remanufacturing eines Produkts. Diese Kenntnisse tragen somit zu grundsätzlichen Entscheidungen über die Eignung für ein Remanufacturing bei. Außerdem kann an der systematischen Verringerung von hemmenden Faktoren gearbeitet werden.

3.2 Auswahl der Produktbeispiele

Zur Bewertung von Produkten wurden exemplarisch insgesamt acht Produktbeispiele aus mehreren Branchen ausgewählt (vgl. Tabelle 7). Die Produktbeispiele decken die relevanten Branchen für Remanufacturing ab und repräsentieren rund 99 % der Umsätze und Arbeitskräfte in der deutschen Remanufacturing-Industrie (vgl. Kapitel 2.2).

Während manche Aspekte, wie z. B. gesetzliche Rahmenbedingungen, typisch für eine Branche sind, hängen andere direkt von den jeweiligen Produkten oder auch einzelnen Unternehmen ab. Deshalb ist eine Einzelfallbetrachtung für jedes Produkt erforderlich. In diesem Zusammenhang wurden im Bereich der Elektronik (EEE) zwei Beispielprodukte ausgewählt: aufgearbeitete Laptops und Desktoprechner. Diese Produktbeispiele sind sich auf

den ersten Blick sehr ähnlich, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Bewertung einiger Aspekte.

Tabelle 7: Übersicht der Produktbeispiele

Nr.	Branche	Beispielprodukt
1	Luftfahrt	Flugzeugtriebwerke
2	Automotive und Schwerlast	Anlasser und Lichtmaschinen
3	Automotive und Schwerlast	Verbrennungsmotoren für Automobile und Kleintransporter
4	Elektrisches und elektronisches Equipment	Laptops
5	Elektrisches und elektronisches Equipment	Desktop PCs
6	Maschinenbau	Wasserzähler
7	Medizintechnik	Medizintechnische Geräte
8	Möbel	Wohnmöbel und Haushaltsmöbel

Die Produktbeispiele werden nachfolgend mithilfe der in Kapitel 3.1.2 entwickelten Bewertungsmatrix analysiert. Die Bewertungsmatrix für jedes Produktbeispiel wurde in Absprache mit Experten aus den jeweiligen Branchen ausgefüllt.

3.3 Bewertung der Produktbeispiele

3.3.1 Flugzeugtriebwerke

In der Luftfahrtbranche werden die Wartung und Aufarbeitung von Triebwerken als MRO (engl. Maintenance, Repair and Overhaul) bezeichnet. Für die Wartung von Flugzeugen und Triebwerken existiert weltweit ein großer Markt. Beispielsweise überstieg der Umsatz der Luftfahrtbranche im Jahr 2017 in Deutschland 4,5 Mrd. Euro (vgl. Tabelle 1 in Kapitel 2.2). Die Sicherheitsanforderungen in der Branche sind im Vergleich zu anderen sehr hoch.

Tabelle 8 zeigt die Bewertung eines Flugzeugtriebwerkes MRO, die mit einem Experten der Branche diskutiert wurde[54]. Wie daraus ersichtlich wird, verfügt die Aufarbeitung von Triebwerken mit einer Gesamtbewertung von 1,51 über ein hohes Remanufacturing-Potenzial.

[54] **Expertenbefragung, vertraulich.**

Das *Design* der Triebwerke ist auf eine lange Lebensdauer ausgerichtet. Die Erhaltung der Triebwerke liegt auf Grund der hohen Kosten im Interesse der Betreiber. Außerdem können Triebwerke nicht einfach nachgekauft werden, vielmehr existieren lange Vorlaufzeiten. Dies ist auf die Komplexität der Produkte, die damit einhergehenden hohen Anforderungen, Sicherheitsvorschriften sowie auch auf die geringe Anzahl von Herstellern zurückzuführen. Die Betriebssicherheit ist ein äußerst wichtiger Punkt. Da der Ausfall von Triebwerken potenziell zu dramatischen Auswirkungen bis hin zum Absturz eines Flugzeugs führen kann, gibt es strenge Vorgaben zu Wartung und Prüfung. Dementsprechend sind die Triebwerke auf lange Lebensdauern und Wartungsfreundlichkeit ausgerichtet. Auf Grund der Komplexität ist jedoch nur eine geringe Automatisierung möglich, der manuelle Arbeitsaufwand bei der Triebwerkswartung entsprechend hoch.

Im Bereich der *reversen Logistik* bilden die Triebwerke ein Paradebeispiel. Da es wenige Betreiber (Airlines) gibt, sind Informationen zum Verbleib der Triebwerke vorhanden. Diese Produkte können ab der Inbetriebnahme nachverfolgt werden. Dies findet mittlerweile oft in Echtzeit statt; Leistungsdaten von Triebwerken werden während des Fluges an Hersteller bzw. MRO-Operator übermittelt. Für die vorgeschriebenen Wartungen kommen die Triebwerke in den meisten Fällen am Flugzeug in die Wartung, was entsprechend zu einem geringeren Transportaufwand führt. Durch die Vorschriften zu Wartungszyklen ist eine sehr gute Planbarkeit vorhanden.

Auch das *Geschäftsmodell* ist bei der Triebwerkswartung als sehr gut zu bewerten. Durch die starke Reglementierung des Marktes mit Blick auf Wartungszyklen und Sicherheitsvorgaben sowie durch die Komplexität der Produkte gibt es eine geringe Anzahl qualifizierter Unternehmen am Markt. Der Konkurrenzdruck ist entsprechend niedrig, was demzufolge zu einer hohen Auslastung der Anbieter mit relativ langen Vorlauf- und Wartezeiten für Kunden führt.

Bei den *weiteren Aspekten* stellt ein Mangel an Fachkräften eine Herausforderung für die Unternehmen dar. Das Markenrisiko lässt sich für die MRO-Unternehmen als hoch einstufen. Die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalles ist zwar gering, dafür fällt das Risiko für die Airline sowie für das MRO-Unternehmen sehr hoch aus.

Tabelle 8: Bewertungsmatrix: Flugzeugtriebwerke

*RP = Remanufacturing-Potenzial

		Flugzeugtriebwerke	RP*
		Gesamtpotenzial	1,51
Technische Aspekte & Design			1,40
Materialien			
TAD-01	Materialdeklarationen verfügbar/ Identifikation von Materialien leicht möglich	Dokumentation aller Materialien vorhanden	2
TAD-02	Identifikation von Modulen leicht möglich	Dokumentation vorhanden, überschaubare Produktvielfalt	2
TAD-03	gefährliche, toxische Stoffe (bei Handling, Gefährdung von Mitarbeitern)	in manchen Reparaturschritten, aber explizit deklariert mit Warnhinweisen	2
TAD-04	umweltkritische und gefährliche Stoffe (ggf. mit gesetzlicher Restriktion bei Wiederinverkehrbringung)	nicht gegeben	2
Modularität und Langlebigkeit			
TAD-05	Gesamtprodukt wiederverwendbar – effizienter Ausbau und Austausch von nicht wiederverwendbaren Modulen	Wartung erhält das Produkt in Gänze (aufwändig, aber in sinnvollem Umfang)	2
TAD-06	Gesamtprodukt nicht wiederverwendbar – effiziente Entnahme wiederverwendbarer Einzelteile	gegeben – Produktbestanteile können auch nach dem Ende der Lebenszyklen noch als Ersatzteile genutzt werden	2
TAD-07	hoher Standardisierungsgrad der Demontage	exakte Vorschriften zu Wartungsabläufen, hervorragende Dokumentation der Bauteile und Wartungsschritte	2
TAD-08	hoher Automatisierungsgrad der Demontage	eher niedrig, fast alles manuelle Arbeit, hoher Personalaufwand, D-Check bis zu 50.000 Arbeitsstunden	-1
TAD-09	Langlebigkeit von Bauteilen und Modulen	neutral, regelmäßige Wartung und Überholung nötig/vorgeschrieben	0
TAD-10	Updatefähigkeit/Kompatibilität zu neuen Produktgenerationen	gegeben – innerhalb eines Triebwerktyps, bei neuen Triebwerksmustern keine Kompatibilität und Updatefähigkeit mehr	1
Technische Aspekte reverse Logik			2,00
Identifikation (Produkt, Alter etc.)			
TAL-01	Information zum Verbleib des Produktes/Verfügbarkeit für Rückführung	Bestand bekannt, wenige Betreiber (Airlines). Back-to-birth-tracking über Airlines, Flugstunden, Strecken ...	2
TAL-02	eindeutige Produktzuordnung	gegeben – Bestand bekannt, wenige Betreiber (Airlines)	2
TAL-03	Materialien klar identifizierbar (falls keine Materialdeklaration)	N/A	N/A
TAL-04	Alter und Zustand identifizierbar (technisch/Dokumentation)	gegeben – Bestand bekannt, wenige Betreiber (Airlines)	2
Sammlung & Rückführung			
TAL-05	geringer Transportaufwand je Produkteinheit	Triebwerke kommen typischerweise am Flugzeug in die Wartung. Einzeltriebwerke können bei Bedarf überführt werden	2
TAL-06	hoher Wert im Verhältnis zum Sammlungsaufwand	Betreiber bringt das Triebwerk typischerweise zur Wartung, dadurch recht niedriger Aufwand	2
TAL-07	etabliertes/funktionierendes Sammel-/ Rückführsystem	Betreiber muss die Wartung organisieren, gegeben	2
TAL-08	gesetzliche Vorgaben zur Sammlung und Rückführung	Vorgaben zu den Wartungsintervallen	2

		Flugzeugtriebwerke	RP*
Lagerung			
TAL-09	gute Lagerfähigkeit	hoher Platzbedarf, aber kein Verderb und geringe Umweltbeeinflussung	2
TAL-10	planbarer Lagerbestand (Wareneinausgang)	regelmäßige Wartungsintervalle erlauben eine gute Planung	2
TAL-11	gute Sortierbarkeit ausgebauter Module	gegeben	2
TAL-12	hohe Standardisierung der Module	gegeben	2
Geschäftsmodelle			1,88
GEM-01	konstante und planbare Rücknahmemengen	Vorschriften zu Wartungszyklen resultieren in planbaren Rücknahmemengen	2
GEM-02	konstanter und planbarer Absatzmarkt	lange Vorlaufzeiten. Was zum Remanufacturing kommt, wird auch verkauft/bleibt Eigentum der Nutzer	2
GEM-03	etabliertes und verlässliches Rücknahmesystem hinsichtlich Rücknahme- und Absatzmenge (lebenszyklusübergreifende Produktverantwortung)	gegeben	2
GEM-04	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben)	Sicherheitsvorschriften zu Wartungsintervallen	2
GEM-05	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben) des Absatzmarktes, wie z. B. Zulassungskriterien	Sicherheitsvorschriften zu Wartungsintervallen	2
GEM-06	Marktakzeptanz aufgearbeiteter Produkte	Wartung ist gesetzlich vorgeschrieben und aus Sicherheitsgründen notwendig	2
GEM-07	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch Neuprodukte	hohe Auslastung der Hersteller, dadurch kein beliebig schnell hochfahrendes Produktionsvolumen, lange Wartezeiten, hohe Markteintrittsbarrieren für neue Akteure durch Sicherheitsvorschriften	2
GEM-08	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch andere aufgearbeitete Produkte	überschaubare Anzahl von Akteuren – hohe Nachfrage, geringe Anzahl von qualifizierten Konkurrenten/bei Altprodukten gibt es oft die Abwägung zwischen einem gebrauchten Triebwerk anstelle einer teuren Wartung	1
Weitere Aspekte			0,75
OTH-01	Sicherheits- oder Ausfallrisiko durch aufgearbeitete Produkte	gering – hohe Zulassungsanforderungen, etablierte Prozesse	2
OTH-02	Markenrisiko (bei vorzeitigem Ausfall aufgearbeiteter Produkte)/Branding als aufgearbeitetes Produkt (B2C) (Qualitätswahrnehmung) [falls relevant]	Wahrscheinlichkeit ist gering, aber Risiko ist extrem, auch für MRO-Operator	0
OTH-03	Wertwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte (Qualität von Up-, Down- und Recycling)	hoch – gleiche oder höhere Qualität, Wartung steht für Sicherheit und Qualität	2
OTH-04	gutes Angebot an qualifizierten Mitarbeitern	tendenziell Mangel an Fachkräften	-1

3.3.2 Anlasser und Lichtmaschinen

In der Automobilbranche werden Anlasser und Lichtmaschinen seit langer Zeit aufgearbeitet. Die Aufarbeitung von Teilen in dieser Branche ist generell ein etablierter Markt, was sich auch in einem Umsatz von mehr als 4 Mrd. Euro in Deutschland in 2017 zeigt (vgl. Tabelle 1, Kapitel 2.2).

Die Bewertung der Aufarbeitung von Anlassern und Lichtmaschinen ist in Tabelle 9 dargestellt und bezieht sich auf marktübliche Betrachtungen sowie Analysen, ohne spezifische Produktarten oder Geschäftsmodelle einzelner Akteure zu berücksichtigen. Dies erfolgt anhand aufgearbeiteter Verbrennungsmotoren (Kapitel 3.3.3). Das Ergebnis der Bewertung der Anlasser und Lichtmaschinen zeigt mit einem Gesamtwert von 0,73 ein gutes Remanufacturing-Potenzial.

Das *Produktdesign* trägt dazu insbesondere durch die gute Identifizierbarkeit von Materialien bei, u. a. aufgrund der im Automobilbereich weit verbreiteten Materialdeklarationen auf Basis des International Material Data Systems (IMDS, deutsch Internationales Materialdatensystem), welches ein global standardisiertes Austausch- und Verwaltungssystem für Materialdaten in der Automobilindustrie ist. Auch unterstützen standardisierte Prozesse bei der Demontage sowie die Langlebigkeit der Bauteile die Aufarbeitung. Als Schwachstellen können die geringe Wiederverwendbarkeit einzelner Module sowie die fehlende Kompatibilität zwischen verschiedenen Modellen und Baureihen gesehen werden.

Die *reverse Logistik* wird als sehr gut bewertet. Es gibt durch Zulassungen und Produktdeklarationen sowie Informationen zur Modellreihe und zum Baujahr gute Kenntnisse zum Verbleib der Produkte. Der Transportaufwand für die Rückführung der Produkte ist gering und durch Rücknahmeverordnungen wie die End of Life of Vehicle Directive (ELV, deutsch Richtlinie über Altfahrzeuge) geregelt.

Auch die *Geschäftsmodelle* sind als positiv zu bewerten. Durch die sogenannten Hauptuntersuchungen (regelmäßige Zustandsprüfung durch zertifizierte Stellen) und die ELV ist der Rücknahmemarkt sehr gut organisiert. Durch eine hohe Anzahl von Akteuren am Markt entsteht aber ein großer Konkurrenz- und Preisdruck.

Bei den *weiteren Aspekten* tragen insbesondere das geringe Ausfallrisiko aufgearbeiteter Teile durch etablierte Qualitätssicherungsprozesse und ein geeignetes Angebot qualifizierter Mitarbeiter zu einer guten Bewertung bei.

Tabelle 9: Bewertungsmatrix: Anlasser und Lichtmaschinen

*RP = Remanufacturing-Potenzial

		Anlasser & Lichtmaschinen	RP*
		Gesamtpotenzial	0,73
Technische Aspekte & Design			0,20
Materialien			
TAD-01	Materialdeklarationen verfügbar/ Identifikation von Materialien leicht möglich	ja durch IMDS	2
TAD-02	Identifikation von Modulen leicht möglich	schwierig durch integrierte Bauweise, aber Module an sich bekannt	0
TAD-03	gefährliche, toxische Stoffe (bei Handling, Gefährdung von Mitarbeitern)	keine bei mechanischen Elementen, evtl. bei der Elektronik	1
TAD-04	Umweltkritische und gefährliche Stoffe (ggf. mit gesetzlicher Restriktion bei Wiederinverkehrbringung)	keine bei mechanischen Elementen, evtl. bei der Elektronik	1
Modularität und Langlebigkeit			
TAD-05	Gesamtprodukt wiederverwendbar – effizienter Ausbau und Austausch von nicht wiederverwendbaren Modulen	gegeben, aber Produkt nicht auf Wiederverwendung optimiert	1
TAD-06	Gesamtprodukt nicht wiederverwendbar – effiziente Entnahme wiederverwendbarer Einzelteile	nicht gegeben	-2
TAD-07	hoher Standardisierungsgrad der Demontage	durch Fachpersonal in standardisiertem Prozess machbar	1
TAD-08	hoher Automatisierungsgrad der Demontage	eher niedrig, fast alles manuelle Arbeit	-1
TAD-09	Langlebigkeit von Bauteilen und Modulen	grundsätzlich gegeben	1
TAD-10	Updatefähigkeit/Kompatibilität zu neuen Produktgenerationen	nicht gegeben, da abhängig von Modell und Baureihe	-2
Technische Aspekte reverse Logik			1,45
Identifikation (Produkt, Alter etc.)			
TAL-01	Information zum Verbleib des Produktes/Verfügbarkeit für Rückführung	hoch durch Zulassung	2
TAL-02	eindeutige Produktzuordnung	gegeben durch Informationen zu Baujahr und Modellreihe	2
TAL-03	Materialien klar identifizierbar (falls keine Materialdeklaration)	N/A	N/A
TAL-04	Alter und Zustand identifizierbar (technisch/Dokumentation)	gegeben durch Informationen zu Baujahr und Modellreihe	2
Sammlung & Rückführung			
TAL-05	geringer Transportaufwand je Produkteinheit	ausgebautes Produkt ist gut transportierbar	1
TAL-06	hoher Wert im Verhältnis zum Sammlungsaufwand	relativ geringer Aufwand durch etablierte/systematische Rücknahme, z. B. durch Werkstätten oder Entsorger	1
TAL-07	etabliertes/funktionierendes Sammel-/Rückführsystem	etablierte/systematische Rücknahme, z. B. durch Werkstätten oder Entsorger	2

		Anlasser & Lichtmaschinen	RP*
TAL-08	gesetzliche Vorgaben zur Sammlung und Rückführung	ELV	2
Lagerung			
TAL-09	gute Lagerfähigkeit	gut lagerbar	2
TAL-10	planbarer Lagerbestand (Wareneingang/-ausgang)	durch Typenvielfalt eingeschränkt, prinzipiell aber gut	1
TAL-11	gute Sortierbarkeit ausgebauter Module	Dokumentation nach Ausbau erforderlich	1
TAL-12	hohe Standardisierung der Module	hohe Typenvielfalt	0
Geschäftsmodelle			0,75
GEM-01	konstante und planbare Rücknahmemengen	generell ja, durch Typenvielfalt aber eingeschränkt	1
GEM-02	konstanter und planbarer Absatzmarkt	generell ja, durch Typenvielfalt aber eingeschränkt	1
GEM-03	etabliertes und verlässliches Rücknahmesystem hinsichtlich Rücknahme- und Absatzmenge (lebenszyklusübergreifende Produktverantwortung)	gegeben durch ELV	2
GEM-04	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben)	durch TÜV und ELV regelmäßige Überprüfung und ggf. Austausch	2
GEM-05	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben) des Absatzmarktes, wie z. B. Zulassungskriterien	eher keine Zulassungskriterien	0
GEM-06	Marktakzeptanz aufgearbeiteter Produkte	tendenziell eher hoch, aber fehlendes Nachweis-/Garantiesystem	1
GEM-07	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch Neuprodukte	reiner Repair-Markt, dadurch hohe Konkurrenz durch Neuprodukte	0
GEM-08	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch andere aufgearbeitete Produkte	relativ viele Akteure am Markt, hohe Konkurrenz	-1
Weitere Aspekte			0,50
OTH-01	Sicherheits- oder Ausfallrisiko durch aufgearbeitete Produkte	gering	2
OTH-02	Markenrisiko (bei vorzeitigem Ausfall aufgearbeiteter Produkte)/Branding als aufgearbeitetes Produkt (B2C) (Qualitätswahrnehmung) [falls relevant]	gegeben	0
OTH-03	Wertwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte (Qualität von Up-, Down- und Recycling)	tendenziell eher niedrigere Qualität, da Abnutzung auftritt	-1
OTH-04	gutes Angebot an qualifizierten Mitarbeitern	gegeben	1

3.3.3 Verbrennungsmotoren für Automobile und Kleintransporter

Neben dem Beispiel für Anlasser und Lichtmaschinen aus Kapitel 0 findet eine weitere Produktbewertung aus dem Bereich Automotive statt. In enger Zusammenarbeit mit der Firma HERRMANNS GmbH aus Hailtingen, die sich seit Jahrzehnten auf das Remanufacturing von Fahrzeugtechnik für Mercedes-Benz spezialisiert, erfolgt die Bewertung des Remanufacturing von Verbrennungsmotoren. Dabei werden Verbrennungsmotoren inklusive Sensorik

und Aktuatorik untersucht ohne weitere Steuerelektronik oder Aggregate, die in Zusammenhang mit dem Verbrennungsmotor stehen.

Die Ergebnisse der Bewertung sind in Tabelle 10 aufgeführt. Da diese Ergebnisse zusammen mit dem Geschäftsführer der Firma Herrmanns[55] gewonnen wurden, spiegeln sie die derzeitige Situation der Geschäftstätigkeit wider. Das Gesamtergebnis zeigt mit einem Wert von 0,77 ein gutes Remanufacturing-Potenzial.

Das *Produktdesign* zeichnet sich durch die gute Identifizierbarkeit und Austauschbarkeit von Modulen bzw. Bauteilen eines Verbrennungsmotors aus. Die Identifikation von Materialien oder Materialdeklarationen spielt eine untergeordnete Rolle. Kernstück des Geschäftsmodells ist die Identifikation auf Bauteilebene über Herstellerinformationen oder Marktkenntnisse. Trotz der Vielschichtigkeit und Variantenvielfalt ist sogar eine baureihenübergreifende Austauschbarkeit realisiert. Dies ist ein Alleinstellungsmerkmal, was u. a. auch das Geschäftsmodell beeinflusst. Aufgrund der Vielfalt bedarf es standardisierter Abläufe wie hausinterner Standards. Gleichzeitig bietet sich jedoch keinerlei Potenzial zur Automatisierung an, da sich nahezu jedes Einzelteil technisch von anderen unterscheidet, wie beispielsweise in der Geometrie, Art und Ausführung der Verbindungssysteme oder aufgrund unterschiedlicher elektrischer Anschlüsse. Der Zustand korrodierter Befestigungen und Verbindungen sowie der Verschmutzungs- oder Verschleißgrad erschweren das Remanufacturing.

Die *reverse Logistik* wird als sehr gut bewertet. Dies leitet sich hauptsächlich aus dem eingeführten Pfandsystem ab. Das Pfandsystem erlaubt nicht nur Produktnachverfolgbarkeit und Kundenbindung, sondern reflektiert auch den Qualitätszustand. Materialermüdung oder innenseitiger Verschleiß wird als einzige Einschränkung nicht erfasst. Bezüglich der Transportaufwendungen sind keine wesentlichen Vor- oder Nachteile aufführbar, sodass sich eine neutrale Bewertung ergibt. Die Lagerung selbst wird sehr positiv bewertet mit der einzigen Einschränkung, dass die Teilevielfalt einen entsprechenden Platzbedarf hat, der wenig Standardisierung möglich macht.

[55] Herrmann, H. (2020).

Auch die *Geschäftsmodelle* werden weitgehend positiv bewertet. Das Pfandsystem, das wie erwähnt im Fokus des Geschäftsmodells steht, beeinflusst die Warenströme, die Eingangsprüfung und Qualitätszusicherung. Ein Qualitätsnachweis der wiederaufgearbeiteten Bauteile oder Produkte ist indirekt möglich. Da die Bauteile auch nach dem Remanufacturing ihre Zulassung behalten, werden diese erst im Zuge einer Fahrzeughauptuntersuchung standardmäßig überprüft, identisch zu Neuprodukten. Somit erfährt der Kunde durch seine Hauptuntersuchungen des Fahrzeugs einen langfristigen Qualitätsnachweis, falls die wiederaufgearbeiteten Bauteile nicht beanstandet werden. Hinsichtlich direkter Qualitätsnachweise oder Garantien ist der Remanufacturing-Markt allerdings intransparent. Direkt im Absatzmarkt ist kaum Unterstützung z. B. durch Nachweise oder Regulierungen vorhanden. Marktakzeptanz und die Darstellung des Markenwertes entstehen nur durch langfristige positive Kundenerfahrungen, indem wiederaufgearbeitete Produkte nicht negativ im Zuge der Fahrzeughauptuntersuchung auffallen und somit die Reputation des Remanufacturers unterstützen.

Bei den *weiteren Aspekten* tragen insbesondere geringe Ausfallrisiken durch gründliche Analyse der Bauteile und standardisierte Austauschregeln für Verschleißteile zu einem guten Remanufacturing bei. Als Beispiel lässt sich hierbei der grundsätzliche, in jedem Fall stattfindende Austausch von Zylinderkopfdichtungen nennen, welchen die Firma HERRMANNS GmbH als Markenpflege verfolgt, um die oben genannte langfristige Reputation zu erhalten. Dies führt zu höheren Kosten, minimiert aber das Markenrisiko und kann sogar in einzelnen Fällen bei entsprechender Aufarbeitung ein Upcycling von Bauteilen ermöglichen. Lediglich die fehlende externe Ausbildung des Personals und der dadurch entstehende Mangel an Experten weisen ein negatives Remanufacturing-Potenzial auf. Zur Qualifizierung des Personals werden ausschließlich die Erfahrungen herangezogen sowie organisierte hausinterne Einarbeitungen und Schulungen durchgeführt.

Tabelle 10: Bewertungsmatrix: Verbrennungsmotoren für Automobile und Kleintransporter

*RP = Remanufacturing-Potenzial

		Verbrennungsmotor der HERRMANNS GmbH, ohne Elektronik nur mit Sensorik, Aktuatorik	RP*
		Gesamtpotenzial	0,77
Technische Aspekte & Design			1,00
Materialien			
TAD-01	Materialdeklarationen verfügbar/Identifikation von Materialien leicht möglich	Zugriff auf IMDS nicht immer gegeben, aber Material nicht allein relevant, Bauteile relevanter	0
TAD-02	Identifikation von Modulen leicht möglich	wichtig und gegeben, durch After-sale-Market und durch Hersteller (da remanufacturing-freundlich)	2
TAD-03	gefährliche, toxische Stoffe (bei Handling, Gefährdung von Mitarbeitern)	Öle müssen entfernt werden, aber kein Problem	2
TAD-04	umweltkritische und gefährliche Stoffe (ggf. mit gesetzlicher Restriktion bei Wiederinverkehrbringung)	eventuell Öle, aber klar identifizierbar und/oder entnehmbar	2
Modularität und Langlebigkeit			
TAD-05	Gesamtprodukt wiederverwendbar – effizienter Ausbau und Austausch von nicht wiederverwendbaren Modulen	klar identifizierbar und zerlegefähig	2
TAD-06	Gesamtprodukt nicht wiederverwendbar – effiziente Entnahme wiederverwendbarer Einzelteile	klar identifizierbar und zerlegefähig	2
TAD-07	hoher Standardisierungsgrad der Demontage	standardisierter Ablauf der Demontage gegeben, aber sehr hohe Variantenvielfalt des Produktes	1
TAD-08	hoher Automatisierungsgrad der Demontage	Verschmutzungsgrad und/oder Korrosion zwingt zu manuellem Handling	-2
TAD-09	Langlebigkeit von Bauteilen und Modulen	relativ viele Austauschteile/Verschleißteile und alle müssen funktionieren, Kernprodukt, aber langlebig	1
TAD-10	Updatefähigkeit/Kompatibilität zu neuen Produktgenerationen	Anpassungsfähigkeit auf ähnliche Produktfamilien gegeben (z. B C-Klasse auf E-Klasse funktioniert); diese flexible Anwendbarkeit ist Teil des Geschäftsmodells	0
Technische Aspekte reverse Logik			0,91
Identifikation (Produkt, Alter etc.)			
TAL-01	Information zum Verbleib des Produktes/Verfügbarkeit für Rückführung	Altteilpfandsystem eingeführt, dadurch sehr gute Bindung, regelt auch Zustand des Produktes (Pfandrückgabe entsprechend Zustand)	2
TAL-02	eindeutige Produktzuordnung	Produkt ist bekannt und/oder identifizierbar, Lieferant liefert Produktidentifikation mit (Bestandteil des Vertrages), Fachpersonal klärt gezielt im Falle von Unklarheit	2
TAL-03	Materialien klar identifizierbar (falls keine Materialdeklaration)	Materialien nicht wichtig, eher die Module/Bauteile sind wichtig	N/A
TAL-04	Alter und Zustand identifizierbar (technisch/Dokumentation)	gegeben durch Pfandsystem und Produktzuordnung, aber Zustand innen oder Materialermüdung nicht möglich zu identifizieren (sonst wäre volle Punktzahl)	1

		Verbrennungsmotor der HERRMANNS GmbH, ohne Elektronik nur mit Sensorik, Aktuatorik	RP*
Sammlung & Rückführung			
TAL-05	geringer Transportaufwand je Produkteinheit	normale Spedition	0
TAL-06	hoher Wert im Verhältnis zum Sammlungsaufwand	ganz normales Transportgut	0
TAL-07	etabliertes/funktionierendes Sammel-/Rückführsystem	nur eigenes Sammelsystem, dies ist sehr etabliert und wichtig für Geschäftsabschlüsse, Einfluss durch ELV nicht gegeben	0
TAL-08	gesetzliche Vorgaben zur Sammlung und Rückführung	ELV liefert keine Unterstützung	0
Lagerung			
TAL-09	gute Lagerfähigkeit	gut lagerbar, Thema ist lediglich Platzbedarf	1
TAL-10	planbarer Lagerbestand (Warenein-/-ausgang)	Planbarkeit gegeben durch Pfandsystem	2
TAL-11	gute Sortierbarkeit ausgebauter Module	nach Ausbau gegeben	2
TAL-12	hohe Standardisierung der Module	Standardisierung ist im Grunde nicht gegeben, wird aber gezielt durch Know-how kompensiert; hohe Typenvielfalt, aber Flexibilität als Geschäftsmodell ist installiert (Einsetzbarkeit von Modulen/Bauteilen über Produktgruppengrenzen)	0
Geschäftsmodelle			0,43
GEM-01	konstante und planbare Rücknahmemengen	durch Pfandsystem gegeben	2
GEM-02	konstanter und planbarer Absatzmarkt	übliche Marktsituation	2
GEM-03	etabliertes und verlässliches Rücknahmesystem hinsichtlich Rücknahme- und Absatzmenge (lebenszyklusübergreifende Produktverantwortung)	N/A	N/A
GEM-04	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben)	reine Transfertätigkeit, d. h., Zulassung des Eingangsproduktes bleibt erhalten	0
GEM-05	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben) des Absatzmarktes, wie z. B. Zulassungskriterien	reine Transfertätigkeit, d. h., Zulassung des Eingangsproduktes bleibt erhalten, Austauschteil wird im Rahmen einer späteren HU durch Kunden geprüft und ermöglicht dem Kunden somit Rückschlüsse auf die Qualität der Firma Herrmanns GmbH	1
GEM-06	Marktakzeptanz aufgearbeiteter Produkte	gegeben, eher steigend; Firma Herrmanns gewährt auch 2 Jahre Garantie	1
GEM-07	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch Neuprodukte	Konkurrenzsituation ist da, aber abhängig von Produktvariante (z. B. Oldtimer vs. Transporter)	-1
GEM-08	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch andere aufgearbeitete Produkte	vermehrt Druck auch durch Neuware, die als Remanufacturing-Produkt deklariert wurde, auch Wettbewerber ohne Austauschteile und niederer Qualität stellen Problem dar	-2
Weitere Aspekte			0,75
OTH-01	Sicherheits- oder Ausfallrisiko durch aufgearbeitete Produkte	Qualität ist technisch unter Kontrolle, aber am Markt nicht etabliert und schwer erkennbar, trotzdem positive Bewertung, da Maßnahmen z. B durch Garantie	1

		Verbrennungsmotor der HERRMANNS GmbH, ohne Elektronik nur mit Sensorik, Aktuatorik	RP*
OTH-02	Markenrisiko (bei vorzeitigem Ausfall aufgearbeiteter Produkte)/Branding als aufgearbeitetes Produkt (B2C) (Qualitätswahrnehmung) [falls relevant]	Vertrauen in Marke gegeben, da schon immer so bekannt (kein Wandel des Geschäftsmodells seit Gründung der Firma Herrmanns)	2
OTH-03	Wertwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte (Qualität von Up-, Down- und Recycling)	technische Weiterentwicklungen können eingearbeitet werden, aber Restrisiko (z. B. Materialermüdung) immer möglich	1
OTH-04	gutes Angebot an qualifizierten Mitarbeitern	hausinterne Einarbeitung dauert relativ lange, grundsätzlich anders als bei Reparaturwerkstätten, Erfahrung und Ausbildung nicht hausextern gegeben	-1

3.3.4 Laptops

Die Aufarbeitung von Laptops wird auch als Refurbishing bezeichnet, insofern nur einzelne Module ausgetauscht werden. Defekte oder veraltete Komponenten werden, soweit möglich, ausgetauscht. Oftmals erfolgt sogar lediglich eine Wiederverwendung (engl. re-use), da die Lebenserwartung der Elektronik die Dauer der Erstnutzung übersteigt. Die Geräte werden dabei einer optischen und einer technischen Prüfung unterzogen. Nur in seltenen Fällen erfolgt ein vollumfängliches Remanufacturing. Die Ergebnisse der Bewertung sind in Tabelle 11 dargestellt und beruhen auf Angaben des Geschäftsführers der Firma ELiProCoM GmbH[56]. Das Gesamtergebnis zeigt mit einem Wert von -0,23 ein niedriges Remanufacturing-Potenzial.

Die Bewertung des *Produktdesigns* macht die Nachteile eines hochintegrierten Produkts deutlich. Der Austausch mancher Komponenten gestaltet sich schwierig bis unmöglich. Zwar sind Anschlüsse standardisiert, die verbauten Komponenten variieren jedoch stark. Viele der elektromechanischen Materialien oder auch Füllmaterialien in den Kunststoffen sowie die Kunststoffe selbst sind unbekannt. Materialdeklarationen der Elektronik liegen in der Regel nicht vor und wenn, dann nur bei den Originalherstellern. Während die Updatefähigkeit softwareseitig gut ist, ist sie bei Hardwarekomponenten oft sehr schwierig. Aus diesen Gründen fällt die Bewertung des Designs negativ aus.

[56] Horst, H. (2020).

Die *reverse Logistik* zur Aufarbeitung von Laptops wird insgesamt neutral bewertet. Kenntnisse zum Beschaffungsmarkt liegen fast ausschließlich im B2B-Markt vor, bei Privatanwendern sind keine Kenntnisse zum Verbleib der Produkte vorhanden. Vorgaben für die Sammlung und Rückführung existieren zwar, dienen aber in keiner Weise dem Remanufacturing (oder Refurbishment bzw. dem Re-use), da sie die Rücknahmegeräte als Abfall deklarieren. Ein Wiedereintritt in den Markt oder Handel stellt dann eine zu große Hürde dar. Dieser Nachteil wird aber durch den relativ hohen Produktwert im Verhältnis zum Produktgewicht und durch einen einfachen, unkomplizierten Transport- oder Lageraufwand ausgeglichen.

Die Bewertung der *Geschäftsmodelle* fällt am negativsten von allen Bereichen aus. Hier sind insbesondere die geringe Planbarkeit des Rücknahmemarktes und die daraus resultierende Intransparenz zu verfügbaren Produkten und Komponenten Schwachpunkte. Die Akzeptanz von Kunden für aufgearbeitete Laptops entwickelt sich größtenteils über den Preis, da aufgearbeitete Laptops keinerlei Nachweise oder Qualitätsindizes bieten. Die Kombination aus Intransparenz zur Verfügbarkeit sowie zur Qualität im Absatzmarkt und das gänzliche Fehlen von Regularien oder Gesetzen, die eine Kreislaufwirtschaft unterstützen, führen zur größten Herausforderung, funktionierende und vertrauenswürde Geschäftsmodelle breitenwirksam zu etablieren. Für den Endkunden sind angebotene Waren nicht beurteilbar. Auch Vertrauen ist durch digitale Handelsplattformen und die Vielzahl anonymer Anbieter von Gebrauchtwaren für seriöse Anbieter kaum zu erlangen.

Bei den *weiteren Aspekten* zeigt sich ein stark hemmender Faktor hinsichtlich der Aufarbeitung von Laptops. Durch die oben dargestellte Intransparenz des Marktes und fehlende Rahmenbedingungen bezüglich Qualität und Garantie besteht ein Image-Risiko bei den Markenherstellern, sodass diese bis auf wenige Ausnahmen nicht aktiv im Remanufacturing-Markt auftreten (wollen) und diesen kaum unterstützen. Dennoch zeigt sich dieser Abschnitt auch mit positiver Bewertung, da die Produkte ein geringes Ausfallrisiko haben und jeder Zeit qualifiziertes Personal zur Aufarbeitung der Produkte verfügbar ist.

Tabelle 11: Bewertungsmatrix: Laptops

*RP = Remanufacturing-Potenzial

		Laptops	RP*
		Gesamtpotenzial	-0,23
Technische Aspekte & Design			-0,70
Materialien			
TAD-01	Materialdeklarationen verfügbar/Identifikation von Materialien leicht möglich	hochintegrierte Produkte, Materialien in Verbindung mit Elektronik üblicherweise unbekannt, mechanische und elektromechanische Materialien selten bekannt, Füllmaterialien bei Kunststoffen noch seltener bekannt, über Seriennummern gibt es Infos, ist aber hersteller- und lieferkettenabhängig	-2
TAD-02	Identifikation von Modulen leicht möglich	hohe Produktintegration, Module zwischen Elektronikboard und Gehäuse unterscheidbar	-1
TAD-03	gefährliche, toxische Stoffe (bei Handling, Gefährdung von Mitarbeitern)	eventuell vorhanden, beispielsweise bei Displays – Remanufacturing wird so gut wie nicht von Dritten durchgeführt	0
TAD-04	umweltkritische und gefährliche Stoffe (ggf. mit gesetzlicher Restriktion bei Wiederinverkehrbringung)	Flammhemmer, PVC in Kabeln, Stoffe von der SVHC-Liste, aber oft bei Hersteller bekannt, was enthalten ist, und somit Wiederinverkehrbringen vermeidbar	-1
Modularität und Langlebigkeit			
TAD-05	Gesamtprodukt wiederverwendbar – effizienter Ausbau und Austausch von nicht wiederverwendbaren Modulen	selten, da hochintegriert, aber einzelne Module durchaus tauschbar und sogar upgradefähig	-1
TAD-06	Gesamtprodukt nicht wiederverwendbar – effiziente Entnahme wiederverwendbarer Einzelteile	schwierig, da hochintegriert, aber Einzelkomponenten wie HDD und Speicher sehr gut ausbaufähig (es gibt auch großen Markt an ausgebauten Bauteilen bei hochpreisigen Produkten)	0
TAD-07	hoher Standardisierungsgrad der Demontage	nicht gegeben, individuelle Entwicklungen (Board), Schnittstellen sind standardisiert	-2
TAD-08	hoher Automatisierungsgrad der Demontage	nicht gegeben	-2
TAD-09	Langlebigkeit von Bauteilen und Modulen	viele gegeben (Elektronik funktioniert lange, Abnutzung ist gering; klassische Badewannenkurve), einige nicht (wie Gehäuse, Elko)	1
TAD-10	Updatefähigkeit/Kompatibilität zu neuen Produktgenerationen	Software gute Updatefähigkeit, Hardware teilweise schwierig, nur für ausbaufähige Module möglich	1
Technische Aspekte reverse Logik			0,17
Identifikation (Produkt, Alter etc.)			
TAL-01	Information zum Verbleib des Produktes/Verfügbarkeit für Rückführung	nur B2B bei Serviceverträgen, Auswertung erfolgt aber eher nicht, nie B2C, da dort nur Drittanbieter aktiv sind	0
TAL-02	eindeutige Produktzuordnung	Marke bekannt, Produktdetails online abrufbar (z. B. über Produktnummern), aber weitere Informationen nicht verfügbar	1
TAL-03	Materialien klar identifizierbar (falls keine Materialdeklaration)	nicht gegeben; Metalle und Kunststoffe evtl. visuell identifizierbar	-2
TAL-04	Alter und Zustand identifizierbar (technisch/Dokumentation)	grundsätzlich möglich (Software, Produktgeneration), über Produktnummern, über Zustand gibt es keine Informationen, teilweise über Software Zustand definierbar, die aber nicht einfach/frei verfügbar ist	1

		Laptops	RP*
Sammlung & Rückführung			
TAL-05	geringer Transportaufwand je Produkteinheit	gegeben (klein, stapelfähig, leicht), für Akku allerdings Sonderbehandlung notwendig, was jedoch Standard ist	1
TAL-06	hoher Wert im Verhältnis zum Sammlungsaufwand	Sammlungsaufwand eher hoch, Wert aber auch, besseres Verhältnis bei B2B; bei Niedrigpreisprodukten schlechter	0
TAL-07	etabliertes/funktionierendes Sammel-/Rückführsystem	nur B2B, falls Serviceverträge, sonst möglich über Handel, freiwillig vom Kunden, aber es wird nicht genutzt und das Thema Daten und Vertrauen in Verbleib der Produkte ist ein Hindernis, obwohl einfach über Drittanbieter und Plattformen machbar	0
TAL-08	gesetzliche Vorgaben zur Sammlung und Rückführung	für Remanufacturing nicht gegeben, nur WEEE, da aber bereits als Abfall deklariert und aus Markt entnommen und Rückführung in Markt schwierig	-1
Lagerung			
TAL-09	gute Lagerfähigkeit	Umweltbeeinflussung negativ, Schutz bei Lagerung, evtl. Verschleiß bei Akku zu berücksichtigen, wenn 1 Jahr	1
TAL-10	planbarer Lagerbestand (Wareneingang/-ausgang)	Planbarkeit eingeschränkt nur B2B, nicht bei B2C	-1
TAL-11	gute Sortierbarkeit ausgebauter Module	wenn Identifikation stattfand, dann beste Lagerung möglich	1
TAL-12	hohe Standardisierung der Module	grundsätzlich gegeben, außer bei hoher Integration im Board (z. B. RAM im Board fixiert); hohe Standardisierung bei Schnittstellen	1
Geschäftsmodelle			-0,63
GEM-01	konstante und planbare Rücknahmemengen	nicht gegeben, da kein konstanter Zufluss planbar	-1
GEM-02	konstanter und planbarer Absatzmarkt	gegeben, immer Bedarf und über Preis geregelt	1
GEM-03	etabliertes und verlässliches Rücknahmesystem hinsichtlich Rücknahme- und Absatzmenge (lebenszyklusübergreifende Produktverantwortung)	nicht gegeben, da keinerlei Regelung oder Gesetze unterstützen	-1
GEM-04	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben)	nicht gegeben, da keinerlei Regelung oder Gesetze unterstützen	-1
GEM-05	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben) des Absatzmarktes, wie z. B. Zulassungskriterien	gegeben durch CE-Kennzeichnung, aber im Detail sehr individuell und schwer identifizierbar	-1
GEM-06	Marktakzeptanz aufgearbeiteter Produkte	mittel, da Preis und Performance niedrig, dann Akzeptanz	0
GEM-07	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch Neuprodukte	Neuware in allen Preisklassen verfügbar, damit Konkurrenz nur über Preis vs. Leistungsklasse gegeben; Neuware hat Tendenz, noch günstiger zu werden	-1
GEM-08	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch andere aufgearbeitete Produkte	über Drittanbieter: hoher Wettbewerb für Reuse-Produkte, viele Anbieter und alles über Preis geregelt, Markt ist null reguliert und damit für teurere Remanufacturing-Produkte keine Möglichkeit	-1

		Laptops	RP*
Weitere Aspekte			0,25
OTH-01	Sicherheits- oder Ausfallrisiko durch aufgearbeitete Produkte	Langlebigkeit oft gegeben (Ausnahmen, z. B Elkos), eher Frage der Performance und Sorgfalt der Drittanbieter, die ohne Rahmenbedingungen agieren	1
OTH-02	Markenrisiko (bei vorzeitigem Ausfall aufgearbeiteter Produkte)/Branding als aufgearbeitetes Produkt (B2C) (Qualitätswahrnehmung) [falls relevant]	Markenhersteller verlieren Image, müssten Verantwortung tragen für alle Komponenten (Produktverantwortung), aber Drittanbieter agieren ohne Rahmenbedingungen	-2
OTH-03	Wertwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte (Qualität von Up-, Down- und Recycling)	upgradefähig, aber geringerer Wert im Verhältnis zum Neuprodukt	0
OTH-04	gutes Angebot an qualifizierten Mitarbeitern	Anforderung an Fachkraft eher niedrig und hohe Verfügbarkeit	2

3.3.5 Desktop PCs

Wie Laptops werden auch Desktop PCs aufgearbeitet bzw. refurbished und re-used. Dabei sind trotz der Vergleichbarkeit mit Laptops und folglich ähnlicher Bewertungen Unterschiede zwischen beiden Gerätetypen festzustellen. Die Ergebnisse der Bewertung der Desktop PCs sind in Tabelle 12 dargestellt und beruhen ebenfalls auf Angaben des Geschäftsführers der Firma ELiProCoM GmbH[57]. Das Gesamtergebnis zeigt mit einem Wert von 0,09 gleichfalls ein niedriges, aber verglichen mit Laptops leicht höheres Remanufacturing-Potenzial.

Die Bewertung des *Produktdesigns* legt dar, dass Desktop PCs vorteilhafter für die Wiederaufarbeitung sind als Laptops. Zwar sind auch hier wenige Informationen zu elektromechanischen Materialien, Füllmaterialien oder Materialdeklarationen von Elektronik bekannt, jedoch sind die Module leichter unterscheidbar als jene der Laptops, und der Austausch von Komponenten gestaltet sich deutlich einfacher. So können beispielsweise Grafikkarten oder Festplatten ohne größeren Aufwand getauscht werden. Die Software lässt sich ebenso gut aktualisieren, die Hardware aber erheblich leichter austauschen als bei Laptops. Somit wird das Produktdesign insgesamt als positiv bewertet.

Auch die *reverse Logistik* ist förderlich für das Remanufacturing. Die Bewertung ist identisch zu der von Laptops, lediglich die Modularität der Desktop

[57] **Horst, H. (2020).**

PCs erlaubt eine noch höhere Bewertung bei der Standardisierung der Module (Kriterium TAL-12).

Die Bewertung der *Geschäftsmodelle* zeigt eine identische Bewertung zu Laptops. Beide Produktgruppen unterliegen denselben einschränkenden Randbedingungen des Marktes für aufgearbeitete Produkte.

Auch die Bewertung der *weiteren Aspekte* ist in beiden Produktgruppen identisch. Ausfallrisiken, Markenrisiken und die Wertwahrnehmung bei Kunden unterliegen denselben Bedingungen wie auch die gute Verfügbarkeit qualifizierten Personals.

Tabelle 12: Bewertungsmatrix: Desktop PCs

*RP = Remanufacturing-Potenzial

		Desktop PCs	RP*
		Gesamtpotenzial	0,09
Technische Aspekte & Design			0,50
Materialien			
TAD-01	Materialdeklarationen verfügbar/Identifikation von Materialien leicht möglich	Materialien in Verbindung mit Elektronik üblicherweise unbekannt, mechanische und elektromechanische Materialien selten bekannt, Füllmaterialien bei Kunststoffen noch seltener bekannt; überschaubare Variationen bei Gehäusematerialien; nur in Nuancen leichter als Laptop, da weiterhin dasselbe Thema, nur wer selbst herstellt, hat Zugriff auf Daten	-1
TAD-02	Identifikation von Modulen leicht möglich	Module gut unterscheidbar, innerhalb von Modulgruppen keine Modularität	1
TAD-03	gefährliche, toxische Stoffe (bei Handling, Gefährdung von Mitarbeitern)	bei modernen Geräten keine Gefährdung vermutet	0
TAD-04	umweltkritische und gefährliche Stoffe (ggf. mit gesetzlicher Restriktion bei Wiederinverkehrbringen)	evtl. PVC in Kabeln, aber nur bei Hersteller bekannt, was enthalten ist, und somit Wiederinverkehrbringen vermeidbar	-1
Modularität und Langlebigkeit			
TAD-05	Gesamtprodukt wiederverwendbar – effizienter Ausbau und Austausch von nicht wiederverwendbaren Modulen	gute Austauschbarkeit von Modulen, kaum Austauschbarkeit innerhalb von Modulen (z. B. Lüfter von Grafikkarten, Netzteilen ...), gute Austauschbarkeit gegeben, aber rechtlich ein schwieriges Thema	1
TAD-06	Gesamtprodukt nicht wiederverwendbar – effiziente Entnahme wiederverwendbarer Einzelteile	gute Austauschbarkeit von Modulen	2
TAD-07	hoher Standardisierungsgrad der Demontage	gegeben, aber kein genereller Standard durch individuelle Bauformen	1
TAD-08	hoher Automatisierungsgrad der Demontage	nicht gegeben	-2
TAD-09	Langlebigkeit von Bauteilen und Modulen	viele gegeben (Elektronik funktioniert lange, Abnutzung ist gering; klassische Badewannenkurve), einige nicht (wie Gehäuse, Elko)	2
TAD-10	Updatefähigkeit/Kompatibilität zu neuen Produktgenerationen	Software gute Updatefähigkeit, Hardware austauschbar	2

		Desktop PCs	RP*
Technische Aspekte reverse Logik			0,25
Identifikation (Produkt, Alter etc.)			
TAL-01	Information zum Verbleib des Produktes/Verfügbarkeit für Rückführung	nur B2B bei Serviceverträgen, Auswertung erfolgt aber eher nicht, nie B2C, da dort nur Drittanbieter aktiv sind	0
TAL-02	eindeutige Produktzuordnung	Marke und Produktdetails (inklusive Einzelmodule) identifizierbar, aber weitere Informationen und Details nicht verfügbar	1
TAL-03	Materialien klar identifizierbar (falls keine Materialdeklaration)	nicht gegeben; Metalle und Kunststoffe evtl. visuell identifizierbar	-2
TAL-04	Alter und Zustand identifizierbar (technisch/Dokumentation)	grundsätzlich möglich (Software, Produktgeneration), über Produktnummern, über Zustand gibt es keine Informationen, teilweise über Software Zustand definierbar, die aber nicht einfach/frei verfügbar ist	1
Sammlung & Rückführung			
TAL-05	geringer Transportaufwand je Produkteinheit	gegeben (klein, stapelfähig, leicht), aber nicht so klein wie Laptops	1
TAL-06	hoher Wert im Verhältnis zum Sammlungsaufwand	Sammlungsaufwand eher hoch, Wert aber auch, besseres Verhältnis bei B2B; bei Niedrigpreisprodukten schlechter	0
TAL-07	etabliertes/funktionierendes Sammel-/Rückführsystem	nur B2B, falls Serviceverträge, sonst möglich über Handel, freiwillig vom Kunden, aber es wird nicht genutzt und das Thema Daten und Vertrauen in Verbleib der Produkte ist ein Hindernis, obwohl einfach über Drittanbieter und Plattformen machbar	0
TAL-08	gesetzliche Vorgaben zur Sammlung und Rückführung	für Remanufacturing nicht gegeben, nur WEEE, da aber bereits als Abfall deklariert und aus Markt entnommen, Rückführung in Markt schwierig	-1
Lagerung			
TAL-09	gute Lagerfähigkeit	Umweltbeeinflussung negativ, Schutz bei Lagerung	1
TAL-10	planbarer Lagerbestand (Wareneinausgang)	Planbarkeit eingeschränkt, nur B2B, nicht bei B2C	-1
TAL-11	gute Sortierbarkeit ausgebauter Module	wenn Identifikation stattfand, dann beste Lagerung möglich	1
TAL-12	hohe Standardisierung der Module	grundsätzlich gegeben, hohe Standardisierung bei Schnittstellen	2
Geschäftsmodelle			-0,63
GEM-01	konstante und planbare Rücknahmemengen	nicht gegeben, da kein konstanter Zufluss planbar	-1
GEM-02	konstanter und planbarer Absatzmarkt	gegeben, immer Bedarf und über Preis geregelt	1
GEM-03	etabliertes und verlässliches Rücknahmesystem hinsichtlich Rücknahme- und Absatzmenge (lebenszyklusübergreifende Produktverantwortung)	nicht gegeben, da keinerlei Regelung oder Gesetze unterstützen	-1
GEM-04	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben)	nicht gegeben, da keinerlei Regelung oder Gesetze unterstützen	-1
GEM-05	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben) des Absatzmarktes, wie z. B. Zulassungskriterien	gegeben durch CE-Kennzeichnung, aber im Detail sehr individuell und schwer identifizierbar	-1
GEM-06	Marktakzeptanz aufgearbeiteter Produkte	mittel, da Preis und Performance niedrig, dann Akzeptanz	0

		Desktop PCs	RP*
GEM-07	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch Neuprodukte	Neuware in allen Preisklassen verfügbar, damit Konkurrenz nur über Preis vs. Leistungsklasse gegeben, und Neuware hat Tendenz, noch günstiger zu werden	-1
GEM-08	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch andere aufgearbeitete Produkte	über Drittanbieter: hoher Wettbewerb für Re-use-Produkte, viele Anbieter und alles über Preis geregelt, Markt ist null reguliert und damit für teurere Remanufacturing-Produkte keine Möglichkeit	-1
Weitere Aspekte			0,25
OTH-01	Sicherheits- oder Ausfallrisiko durch aufgearbeitete Produkte	Langlebigkeit oft gegeben (Ausnahmen z. B. Elkos), eher Frage der Performance und Sorgfalt der Drittanbieter, die ohne Rahmenbedingungen agieren	1
OTH-02	Markenrisiko (bei vorzeitigem Ausfall aufgearbeiteter Produkte)/Branding als aufgearbeitetes Produkt (B2C) (Qualitätswahrnehmung) [falls relevant]	durch modulares System ist ein gezielter Einkauf von Markenkomponenten möglich, sind aber üblich nicht freigegeben	-2
OTH-03	Wertwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte (Qualität von Up-, Down- und Recycling)	upgradefähig, aber geringerer Wert im Verhältnis zum Neuprodukt	0
OTH-04	gutes Angebot an qualifizierten Mitarbeitern	Anforderung an Fachkraft eher niedrig und hohe Verfügbarkeit	2

3.3.6 Wasserzähler

Die Firma Lorenz GmbH & Co. KG arbeitet Wasserzähler auf. Diese werden beispielhaft im Rahmen einer Ökobilanz analysiert (vgl. Kapitel 5). Informationen zur Bewertung des Remanufacturing-Potenzials wurden durch das Unternehmen bereitgestellt[58], Tabelle 13 gibt die Ergebnisse wieder.

Das *Produktdesign* ist sehr förderlich für Remanufacturing. Es werden eigene Produkte zurückgenommen und aufgearbeitet, wodurch die verbauten Komponenten bekannt sind. Lediglich die genaue Zusammensetzung der verbauten Elektronikbauteile ist nicht vollständig bekannt. Die einzige Schwachstelle im Produktdesign liegt in dem hohen manuellen Arbeitsaufwand für die Aufarbeitung.

Auch die *reverse Logistik* ist für die Aufarbeitung förderlich. Durch eine Kooperation mit Ableseunternehmen erfolgen der Austausch und die Rückführung von Zählern mit abgelaufener Eichung. Der Aufwand hierdurch ist gering. Zwar gibt es derzeit keine gesetzlichen Vorgaben zur Sammlung und

[58] **Mauss, W. (2020).**

Rückführung, dies könnte aber in der Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes adressiert werden.

Das *Geschäftsmodell* ist ebenfalls ein förderlicher Aspekt. Durch die festgelegten Eichzeiten ist der Rücklauf von Produkten gut planbar. Auch haben aufgearbeitete Produkte eine hohe Akzeptanz durch Kunden und die Qualität wird durch die Eichung nachgewiesen. Derzeit stellt kein anderer Anbieter am deutschen Markt aufgearbeitete Wasserzähler zur Verfügung.

Auch die *weiteren Aspekte* sind förderlich für die Aufarbeitung. Das Ausfallrisiko der Zähler ist nicht höher als das der Neuprodukte. Da die Funktion das Kernkriterium darstellt, ist die Wertwahrnehmung durch die Kunden hoch. Weil die zur Aufarbeitung nötigen Qualifikationen den Mitarbeitern schnell vermittelt werden können, ist auch ein gutes Angebot an Fachkräften vorhanden. Die Bewertung des Remanufacturing-Potenzials fällt mit 1,68 sehr gut aus.

Tabelle 13: Bewertungsmatrix: Wasserzähler

*RP = Remanufacturing-Potenzial

		Wasserzähler	RP*
		Gesamtpotenzial	1,68
Technische Aspekte & Design			1,60
Materialien			
TAD-01	Materialdeklarationen verfügbar/Identifikation von Materialien leicht möglich	Rücknahme eigener Produkte, einfache Identifikation durch gute Produktkenntnis. Produkt mit überschaubarer Komplexität; Elektronikmodul wird nicht materialspezifisch berücksichtigt, sondern nur auf Basis der Funktionalität getauscht	2
TAD-02	Identifikation von Modulen leicht möglich	Rücknahme eigener Produkte, einfache Identifikation durch gute Produktkenntnis; Produkt mit überschaubarer Komplexität. Elektronikmodul wird nicht materialspezifisch berücksichtigt, sondern nur auf Basis der Funktionalität getauscht	2
TAD-03	gefährliche, toxische Stoffe (bei Handling, Gefährdung von Mitarbeitern)	evtl. bei Elektronik oder Display, da explizite Materialdeklaration unbekannt	1
TAD-04	umweltkritische und gefährliche Stoffe (ggf. mit gesetzlicher Restriktion bei Wiederinverkehrbringen)	bei Elektronik evtl. Flammhemmer, PVC in Kabeln, Stoffe von der SVHC-Liste	2
Modularität und Langlebigkeit			
TAD-05	Gesamtprodukt wiederverwendbar – effizienter Ausbau und Austausch von nicht wiederverwendbaren Modulen	gute Wiederverwendbarkeit, in vielen Fällen nur mit geringem Aufarbeitungsaufwand	2
TAD-06	Gesamtprodukt nicht wiederverwendbar – effiziente Entnahme wiederverwendbarer Einzelteile	grundsätzlich alles wiederverwendbar außer der Platine, falls sie gebrochen ist	2

		Wasserzähler	RP*
TAD-07	hoher Standardisierungsgrad der Demontage	gegeben durch überschaubare Anzahl an Produktvarianten	2
TAD-08	hoher Automatisierungsgrad der Demontage	zu großen Teilen manuelle Arbeit	-1
TAD-09	Langlebigkeit von Bauteilen und Modulen	Messingbauteile lange nutzbar, Großteil der anderen Komponenten wiederverwendbar, auch bei Elektronik wird Updatefähigkeit durch leistungsfähige Komponenten gesichert	2
TAD-10	Updatefähigkeit/Kompatibilität zu neuen Produktgenerationen	technische Kompatibilität gegeben (über standardisierte Anschlüsse), durch Einbau von leistungsfähigeren Chips kann Zukunftsfähigkeit (z. B. Funkablesung) gesichert werden	2
Technische Aspekte reverse Logik			1,73
Identifikation (Produkt, Alter etc.)			
TAL-01	Information zum Verbleib des Produktes/Verfügbarkeit für Rückführung	über Ableseverträge und Anbieter sehr gute Nachvollziehbarkeit	2
TAL-02	eindeutige Produktzuordnung	hohe Produktkenntnis, überschaubare Produktvariationen	2
TAL-03	Materialien klar identifizierbar (falls keine Materialdeklaration)	N/A	N/A
TAL-04	Alter und Zustand identifizierbar (technisch/Dokumentation)	durch Dokumentation und Eingangsprüfung gegeben	2
Sammlung & Rückführung			
TAL-05	geringer Transportaufwand je Produkteinheit	Austausch nach Ablauf der Eichzeit vorgeschrieben, Aufwand dadurch gering	2
TAL-06	hoher Wert im Verhältnis zum Sammlungsaufwand	Sammlungsaufwand relativ gering	1
TAL-07	etabliertes/funktionierendes Sammel-/Rückführsystem	über Partner (Ableseunternehmen)	2
TAL-08	gesetzliche Vorgaben zur Sammlung und Rückführung	aktuell keine Vorgaben, aber Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes könnte hier ansetzen	0
Lagerung			
TAL-09	gute Lagerfähigkeit	geringe Umweltbeeinflussung	2
TAL-10	planbarer Lagerbestand (Wareneingang/-ausgang)	gute Planbarkeit durch bekannte Lebensdauer (Eichzeit)	2
TAL-11	gute Sortierbarkeit ausgebauter Module	überschaubare Produktvielfalt, gute Sortierbarkeit	2
TAL-12	hohe Standardisierung der Module	überschaubare Anzahl von Produktvariationen, Einbau an genormten Anschlüssen	2
Geschäftsmodelle			1,63
GEM-01	konstante und planbare Rücknahmemengen	durch Eichzeit gegeben	2
GEM-02	konstanter und planbarer Absatzmarkt	durch Eichzeit gegeben	2
GEM-03	etabliertes und verlässliches Rücknahmesystem hinsichtlich Rücknahme- und Absatzmenge (lebenszyklusübergreifende Produktverantwortung)	über Vertriebspartner	2
GEM-04	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben)	aktuell keine Vorgaben, aber Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes könnte hier ansetzen	0
GEM-05	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben) des Absatzmarktes, wie z. B. Zulassungskriterien	Anforderungen an die Eichung	2
GEM-06	Marktakzeptanz aufgearbeiteter Produkte	gute Akzeptanz aufgearbeiteter Produkte, Kunde unterscheidet nicht zwischen Neuware und aufgearbeiteter Ware, Funktion als Kernkriterium	2

		Wasserzähler	RP*
GEM-07	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch Neuprodukte	wachsender Markt, geringe Konkurrenz	1
GEM-08	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch andere aufgearbeitete Produkte	derzeit keine weiteren aufgearbeiteten Produkte am Markt	2
Weitere Aspekte			1,75
OTH-01	Sicherheits- oder Ausfallrisiko durch aufgearbeitete Produkte	nicht höher als bei Neuprodukten	2
OTH-02	Markenrisiko (bei vorzeitigem Ausfall aufgearbeiteter Produkte)/Branding als aufgearbeitetes Produkt (B2C) (Qualitätswahrnehmung) [falls relevant]	geringes Risiko, kein Unterschied zum Neuprodukt	2
OTH-03	Wertwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte (Qualität von Up-, Down- und Recycling)	gleiche Qualität, Funktion als Kernkriterium	2
OTH-04	gutes Angebot an qualifizierten Mitarbeitern	geringe Qualifikation erforderlich, von daher gutes Angebot an Mitarbeitern	1

Die meisten Akteure im Markt gehen davon aus, dass die Aufarbeitung von Wasserzählern teurer als der Einsatz neuer Geräte ist[59]. Dennoch investierte die Firma Lorenz in den letzten Jahren in die Aufarbeitung von Wasserzählern und die Schaffung des zugehörigen Rücknahme- und Absatzmarktes. Durch einen systematischen Aufbau des Marktes mit der zugehörigen Infrastruktur konnte somit ein funktionierendes Geschäftsmodell entwickelt werden. Die Firma Lorenz arbeitet weiterhin an einer Verbesserung. Sie beteiligt sich an Forschungen zur Entwicklung einer Demontageanlage, um den hohen Aufwand durch manuelle Arbeitsschritte zu reduzieren, was zu einer verbesserten Modularität führt.

3.3.7 Medizintechnische Geräte

Bei medizintechnischen Geräten wird die Aufarbeitung von Röntgengeräten und Kernspinresonanzspektroskopen (engl. Nuclear Magnetic Resonance, NMR) untersucht. Die gewonnenen Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt und weisen darauf hin, dass die untersuchten Geräte mit einem Gesamtwert von 1,39 gut bis sehr gut für das Remanufacturing geeignet sind.

Das *Produktdesign* erweist sich hierbei als sehr förderlich. Die Geräte sind klar gekennzeichnet und auf eine lange Lebensdauer ausgelegt. Durch den Fokus auf B2B-Dienstleistungen sind die Gefahren beim Handling äußerst

[59] Vgl. Minol (2019a), S. 2 und Minol (2019b), S. 4.

gering. Mittels der Norm IEC 63077[60] sind zudem Standards für den Austausch von Betriebsstoffen und Verschleißteilen festgelegt.

Die *reverse Logistik* ist der Aufarbeitung zuträglich. Da typischerweise Serviceverträge geschlossen werden, sind Informationen zum Verbleib der Produkte vorhanden und auch die zu erwartende Lebensdauer absehbar. Zwar sind die Geräte aufgrund ihrer Größe schwierig zu transportieren und benötigen entsprechend große Lagerflächen, durch den hohen Wert wird dies aber gerechtfertigt.

Tabelle 14: Bewertungsmatrix: medizintechnische Geräte

*RP = Remanufacturing-Potenzial

		Medizingeräte	RP*
		Gesamtpotenzial	1,39
Technische Aspekte & Design			1,50
Materialien			
TAD-01	Materialdeklarationen verfügbar/Identifikation von Materialien leicht möglich	oft gegeben, exklusive Elektronik	1
TAD-02	Identifikation von Modulen leicht möglich	gegeben durch Dokumentation und modularen Aufbau	2
TAD-03	gefährliche, toxische Stoffe (bei Handling, Gefährdung von Mitarbeitern)	B2B, etabliertes Compliance System, dadurch Identifikation möglich und Gefährdungspotenzial wird ausgeschlossen (gesetzeskonform)	2
TAD-04	umweltkritische und gefährliche Stoffe (ggf. mit gesetzlicher Restriktion bei Wiederinverkehrbringung)	B2B, etabliertes Compliance System, dadurch Identifikation möglich und Gefährdungspotenzial wird ausgeschlossen; geschultes Personal erhöht Sicherheit	2
Modularität und Langlebigkeit			
TAD-05	Gesamtprodukt wiederverwendbar – effizienter Ausbau und Austausch von nicht wiederverwendbaren Modulen	gegeben (Norm IEC63077), aber komplexe Produkte inklusive Elektronik	1
TAD-06	Gesamtprodukt nicht wiederverwendbar – effiziente Entnahme wiederverwendbarer Einzelteile	gegeben (Norm IEC63077), aber komplexe Produkte inklusive Elektronik	1
TAD-07	hoher Standardisierungsgrad der Demontage	gegeben (Norm IEC63077), aber komplexe Produkte inklusive Elektronik	1
TAD-08	hoher Automatisierungsgrad der Demontage	gegeben (Norm IEC63077), aber komplexe Produkte inklusive Elektronik	1
TAD-09	Langlebigkeit von Bauteilen und Modulen	gegeben, da bekannt und berücksichtigt	2
TAD-10	Updatefähigkeit/Kompatibilität zu neuen Produktgenerationen	gegeben (Norm IEC63077), aber komplexe Produkte inklusive Elektronik	2
Technische Aspekte reverse Logik			0,92
Identifikation (Produkt, Alter etc.)			

[60] IEC 63077:2019-01-15 (Entwurf).

		Medizingeräte	RP*
TAL-01	Information zum Verbleib des Produktes/Verfügbarkeit für Rückführung	gegeben (B2B, Verbleib bekannt, oftmals Serviceverträge)	2
TAL-02	eindeutige Produktzuordnung	gegeben (B2B, Verbleib bekannt, eindeutige Kennzeichnung)	2
TAL-03	Materialien klar identifizierbar (falls keine Materialdeklaration)	gegeben für größere Module, aber exklusive Elektronik	1
TAL-04	Alter und Zustand identifizierbar (technisch/Dokumentation)	gegeben (Dokumentation und Serviceverträge, da B2B, Alter bekannt)	2
Sammlung & Rückführung			
TAL-05	geringer Transportaufwand je Produkteinheit	je nach Größe (NMR nicht gegeben, X-Ray-Austauschmodule gegeben)	0
TAL-06	hoher Wert im Verhältnis zum Sammlungsaufwand	gegeben, da teure und werthaltige Geräte	2
TAL-07	etabliertes/funktionierendes Sammel-/Rückführsystem	individuell und regional unterschiedlich	0
TAL-08	gesetzliche Vorgaben zur Sammlung und Rückführung	IEC63077, aber keine festgeschriebenen Rücknahmequoten	1
Lagerung			
TAL-09	gute Lagerfähigkeit	Umweltbeeinflussung negativ, Schutz bei Lagerung, evtl. sperrige Geräte	0
TAL-10	planbarer Lagerbestand (Wareneins-/-ausgang)	durch Serviceverträge planbar, aber Unsicherheit durch fehlendes Rücknahmesystem	1
TAL-11	gute Sortierbarkeit ausgebauter Module	teilweise gegeben, da sehr individuelle Produkte	0
TAL-12	hohe Standardisierung der Module	teilweise gegeben, da sehr individuelle Produkte	0
Geschäftsmodelle			1,38
GEM-01	konstante und planbare Rücknahmemengen	durch Serviceverträge planbar, aber Unsicherheit durch fehlendes Rücknahmesystem	1
GEM-02	konstanter und planbarer Absatzmarkt	ähnliche Planbarkeit wie bei dem Absatzmarkt für Neuprodukte, aber andere Zielmärkte	2
GEM-03	etabliertes und verlässliches Rücknahmesystem hinsichtlich Rücknahme- und Absatzmenge (lebenszyklusübergreifende Produktverantwortung)	durch Serviceverträge teilweise planbar	1
GEM-04	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben)	IEC63077	2
GEM-05	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben) des Absatzmarktes, wie z.B. Zulassungskriterien	IEC63077	2
GEM-06	Marktakzeptanz aufgearbeiteter Produkte	IEC63077	2
GEM-07	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch Neuprodukte	kann sich ergeben in Niedriglohnländern	1
GEM-08	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch andere aufgearbeitete Produkte	kann sich ergeben durch IEC63077	0
Weitere Aspekte			1,75
OTH-01	Sicherheits- oder Ausfallrisiko durch aufgearbeitete Produkte	gering, da kontrolliert (IEC63077)	2
OTH-02	Markenrisiko (bei vorzeitigem Ausfall aufgearbeiteter Produkte)/Branding als aufgearbeitetes Produkt (B2C) (Qualitätswahrnehmung) [falls relevant]	gering, da kontrolliert (IEC63077)	2
OTH-03	Wertwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte (Qualität von Up-, Down- und Recycling)	gut, da kontrolliert (IEC63077)	2

		Medizingeräte	RP*
OTH-04	gutes Angebot an qualifizierten Mitarbeitern	hohe Anforderung, aber Hersteller und Remanufacturer identisch, dadurch Zugriff auf einen großen Pool an qualifizierten Mitarbeitern	1

Dadurch ergibt sich ein geeignetes *Geschäftsmodell* für die Aufarbeitung, da durch Serviceverträge sehr gute Kenntnisse der Rücknahme- und Absatzmärkte vorliegen. Vorgaben zur Rücknahme sind ebenfalls der Norm IEC 63077[61] zu entnehmen.

Die Bewertung der *weiteren Aspekte* fällt sehr positiv aus. Durch die Normierung sind das Ausfall- und daher auch das Markenrisiko äußerst gering, was zu einer hohen Wertwahrnehmung durch die Kunden führt. Die Aufarbeitung erfolgt typischerweise durch die Hersteller der Geräte. Deshalb verfügen Unternehmen auch über einen ausreichenden Pool an qualifizierten Arbeitskräften für das Remanufacturing.

3.3.8 Wohnmöbel und Haushaltsmöbel

Die Bewertung der Aufarbeitung von Wohn- bzw. Haushaltsmöbeln ist in Tabelle 15 dargestellt. Wie daraus ersichtlich wird, fällt die Bewertung dieser Produktgruppe mit einem Gesamtwert von -0,29 negativ aus. Der Markt für aufgearbeitete Möbel ist aktuell in Deutschland sehr klein (vgl. Kapitel 2.2).

Das *Produktdesign* ist bei Möbelprodukten tendenziell aufgrund einer hohen Produktvielfalt eher ein hemmender Aspekt. Darüber hinaus ist der Austausch von Teilen oder Komponenten meist schwierig und mit einem großen Arbeitsaufwand verbunden, es liegen weder standardisierte Module noch einheitliche oder durchgängige Produktkonzepte vor.

Die *reverse Logistik* stellt derzeit auch einen hemmenden Aspekt dar. Informationen zum Verbleib von Produkten liegen bestenfalls im B2B-Bereich vor. Der Transportaufwand ist im Verhältnis zum Wert der Produkte meist

[61] **IEC 63077:2019-01 (Entwurf).**

hoch und die Lagerung sperriger Teile benötigt viel Platz. Aufgrund der fehlenden Standardisierung von Teilen und der hohen Produktvielfalt gestaltet sich eine effiziente Lagerhaltung als äußerst schwierig.

Dadurch ergeben sich viele hemmende Faktoren bei den *Geschäftsmodellen*. Zwar ist der Konkurrenzdruck innerhalb des Remanufacturing-Marktes gering, dies liegt aber insbesondere am fast nicht existenten Markt. Aufgrund der fehlenden Strukturierung des Rücknahme- und Absatzmarktes sind Planungen kaum möglich. Dennoch ist festzuhalten, dass sich die Branche um entsprechende Geschäftsmodelle bemüht und das Feld der Kreislaufwirtschaft aufgegriffen hat[62]. Eine Bewertung des Portfolios oder einzelner ausgewählter Produkte des Portfolios durch Hersteller, die konkrete Maßnahmen planen oder bereits umsetzen, würde zu entsprechend angepassten Bewertungsergebnissen führen, die im Zuge der Projektdurchführung jedoch nicht zur Verfügung standen.

Die Bewertung der *weiteren Aspekte* fällt hingegen positiv aus. Das Sicherheitsrisiko ist gering. Aufgearbeitete Möbel werden als positiv und qualitativ hochwertig wahrgenommen. Darüber hinaus gibt es eine ausreichende Auswahl an qualifizierten Mitarbeitern für die Aufarbeitung, da sie sich im Grunde nicht von der Neuherstellung unterscheidet.

Tabelle 15: Bewertungsmatrix: Wohn- und Haushaltsmöbel

*RP = Remanufacturing-Potenzial

		Möbel	RP*
		Gesamtpotenzial	-0,29
Technische Aspekte & Design			-0,50
Materialien			
TAD-01	Materialdeklarationen verfügbar/Identifikation von Materialien leicht möglich	selten gegeben, da extreme Produktvielfalt	-2
TAD-02	Identifikation von Modulen leicht möglich	neutral, da hohe Produktvielfalt, aber überschaubare Komplexität der Module	0
TAD-03	gefährliche, toxische Stoffe (bei Handling, Gefährdung von Mitarbeitern)	selten gegeben	1
TAD-04	umweltkritische und gefährliche Stoffe (ggf. mit gesetzlicher Restriktion bei Wiederinverkehrbringung)	potenziell gegeben durch Kunststoffe, Farben oder Holzbehandlung, aber tendenziell geringes Risiko	0
Modularität und Langlebigkeit			

[62] Vgl. IKEA (2019), S. 1.

		Möbel	RP*
TAD-05	Gesamtprodukt wiederverwendbar – effizienter Ausbau und Austausch von nicht wiederverwendbaren Modulen	zerstörungsfreier Austausch üblicherweise schwierig, neue Produktlinien ermöglichen dies aber	0
TAD-06	Gesamtprodukt nicht wiederverwendbar – effiziente Entnahme wiederverwendbarer Einzelteile	zerstörungsfreier Austausch üblicherweise schwierig, neue Produktlinien ermöglichen dies aber	0
TAD-07	hoher Standardisierungsgrad der Demontage	selten	-1
TAD-08	hoher Automatisierungsgrad der Demontage	sehr selten	-2
TAD-09	Langlebigkeit von Bauteilen und Modulen	gegeben in Abhängigkeit von der Produktqualität	1
TAD-10	Updatefähigkeit/Kompatibilität zu neuen Produktgenerationen	nicht gegeben	-2
Technische Aspekte reverse Logik			-1,42
Identifikation (Produkt, Alter etc.)			
TAL-01	Information zum Verbleib des Produktes/Verfügbarkeit für Rückführung	teilweise B2B, nie B2C	-1
TAL-02	eindeutige Produktzuordnung	teilweise B2B, nie B2C	-1
TAL-03	Materialien klar identifizierbar (falls keine Materialdeklaration)	nicht gegeben, aber eher überschaubare Materialmöglichkeiten, Tendenz nimmt aber zu	-1
TAL-04	Alter und Zustand identifizierbar (technisch/Dokumentation)	nicht gegeben, aber optische Bewertung möglich	-1
Sammlung & Rückführung			
TAL-05	geringer Transportaufwand je Produkteinheit	relativ hoher Aufwand, sperrig	-1
TAL-06	hoher Wert im Verhältnis zum Sammlungsaufwand	geringer Wert, relativ hoher Aufwand	-2
TAL-07	etabliertes/funktionierendes Sammel-/Rückführsystem	nicht existent	-2
TAL-08	gesetzliche Vorgaben zur Sammlung und Rückführung	nicht existent	-2
Lagerung			
TAL-09	gute Lagerfähigkeit	Umweltbeeinflussung negativ, Schutz bei Lagerung und Platzbedarf	0
TAL-10	planbarer Lagerbestand (Warenein-/-ausgang)	nicht gegeben	-2
TAL-11	gute Sortierbarkeit ausgebauter Module	nicht gegeben durch hohe Produktvielfalt	-2
TAL-12	hohe Standardisierung der Module	nicht gegeben	-2
Geschäftsmodelle			-0,50
GEM-01	konstante und planbare Rücknahmemengen	nicht gegeben, da Möbelrücknahme im Grunde nicht existiert (Sperrmüll?)	-2
GEM-02	konstanter und planbarer Absatzmarkt	nicht gegeben, nur übliche Marktbedürfnisse	-1
GEM-03	etabliertes und verlässliches Rücknahmesystem hinsichtlich Rücknahme- und Absatzmenge (lebenszyklusübergreifende Produktverantwortung)	nicht gegeben	-2
GEM-04	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben)	nicht gegeben	-2
GEM-05	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben) des Absatzmarktes, wie z. B. Zulassungskriterien	nicht gegeben, aber auch nicht nötig	0

		Möbel	RP*
GEM-06	Marktakzeptanz aufgearbeiteter Produkte	mittel, da Akzeptanz über Preis	0
GEM-07	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch Neuprodukte	Optik, Preis und Qualität nur teilweise mit Neuprodukt vergleichbar	1
GEM-08	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch andere aufgearbeitete Produkte	bisher kein wahrnehmbarer Markt verfügbar	2
Weitere Aspekte			1,25
OTH-01	Sicherheits- oder Ausfallrisiko durch aufgearbeitete Produkte	Langlebigkeit oft gegeben, eher Frage der Optik, Mode	1
OTH-02	Markenrisiko (bei vorzeitigem Ausfall aufgearbeiteter Produkte)/Branding als aufgearbeitetes Produkt (B2C) (Qualitätswahrnehmung) [falls relevant]	nur Markenhersteller verlieren Image, no-name ist es egal, eher Mode-Frage	1
OTH-03	Wertwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte (Qualität von Up-, Down- und Recycling)	ein aufgearbeitetes Möbelstück wird eher positiv wahrgenommen	1
OTH-04	gutes Angebot an qualifizierten Mitarbeitern	möglich für breite Auswahl an Fachkräften	2

3.4 Zusammenfassende Bewertung

Die Bewertung aller Beispielprodukte ist in Tabelle 16 zusammengeführt. Die quantitative Bewertung der Produktbeispiele fällt sehr unterschiedlich aus. Während manche Produkte wie z. B. Wasserzähler, Triebwerke und medizinische Geräte ein hohes Potenzial für Remanufacturing aufweisen, ist das Remanufacturing-Potenzial bei anderen wie z. B. Möbeln und Laptops niedrig.

Für ein hohes Remanufacturing-Potenzial ist nicht nur ein einziger Aspekt wie z. B. das Produktdesign entscheidend. Vielmehr müssen weitere Aspekte wie eine effektive reverse Logistik mit Kenntnissen zum Verbleib der aufzuarbeitenden Produkte, ein funktionierendes Geschäftsmodell mit planbaren Beschaffungs- und Absatzmärkten sowie eine positive Qualitätswahrnehmung durch die Kunden gegeben sein.

In der Bewertungsmatrix können Beurteilungen über Einflüsse einzelner Aspekte auf das Remanufacturing eingetragen und darauf aufbauend Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden. Beispielsweise zeigt sich bei Möbeln, dass vor allem die reverse Logistik eine große Herausforderung darstellt. Durch eine Modifizierung des Geschäftsmodells, beispielsweise über Leasing- oder Wartungsverträge, könnte die Informationslage zum Verbleib der Produkte verbessert und parallel eine Rückführlogistik und dadurch der

Beschaffungsmarkt ausgebaut werden, was zu einer deutlichen Erhöhung des Remanufacturing-Potenzials führt.

Tabelle 16: Zusammenfassende Bewertung aller Beispielprodukte

		Flugzeugtrieb-werke	Anlasser und Lichtmaschinen	Verbrennungs-motoren	Laptops	Desktop PCs	Wasserzähler	Medizintechni-sche Geräte	Wohn- und Haushaltsmöbel
Remanufacturing-Potenzial		1,51	0,73	0,77	-0,23	0,09	1,68	1,39	-0,29
Technische Aspekte & Design		1,40	0,20	1,00	-0,70	0,50	1,60	1,50	-0,50
Materialien									
TAD-01	Materialdeklarationen verfügbar/ Identifikation von Materialien leicht möglich	2	2	0	-2	-1	2	1	-2
TAD-02	Identifikation von Modulen leicht möglich	2	0	2	-1	1	2	2	0
TAD-03	gefährliche, toxische Stoffe (bei Handling, Gefährdung von Mitarbeitern)	2	1	2	0	0	1	2	1
TAD-04	umweltkritische und gefährliche Stoffe (ggf. mit gesetzlicher Restriktion bei Wiederinverkehrbringen)	2	1	2	-1	-1	2	2	0
Modularität und Langlebigkeit									
TAD-05	Gesamtprodukt wiederverwendbar – effizienter Ausbau und Austausch von nicht wiederverwendbaren Modulen	2	1	2	-1	1	2	1	0
TAD-06	Gesamtprodukt nicht wiederverwendbar – effiziente Entnahme wiederverwendbarer Einzelteile	2	-2	2	0	2	2	1	0
TAD-07	hoher Standardisierungsgrad der Demontage	2	1	1	-2	1	2	1	-1
TAD-08	hoher Automatisierungsgrad der Demontage	-1	-1	-2	-2	-2	-1	1	-2
TAD-09	Langlebigkeit von Bauteilen und Modulen	0	1	1	1	2	2	2	1
TAD-10	Updatefähigkeit/Kompatibilität zu neuen Produktgenerationen	1	-2	0	1	2	2	2	-2
Technische Aspekte reverse Logik		2,00	1,45	0,91	0,17	0,25	1,73	0,92	-1,42
Identifikation (Produkt, Alter etc.)									
TAL-01	Information zum Verbleib des Produktes/Verfügbarkeit für Rückführung	2	2	2	0	0	2	2	-1
TAL-02	eindeutige Produktzuordnung	2	2	2	1	1	2	2	-1
TAL-03	Materialien klar identifizierbar (falls keine Materialdeklaration)	N/A	N/A	N/A	-2	-2	N/A	1	-1
TAL-04	Alter und Zustand identifizierbar (technisch/Dokumentation)	2	2	1	1	1	2	2	-1
Sammlung & Rückführung									
TAL-05	geringer Transportaufwand je Produkteinheit	2	1	0	1	1	2	0	-1
TAL-06	hoher Wert im Verhältnis zum Sammlungsaufwand	2	1	0	0	0	1	2	-2

		Flugzeugtrieb-werke	Anlasser und Lichtmaschinen	Verbrennungs-motoren	Laptops	Desktop PCs	Wasserzähler	Medizintechni-sche Geräte	Wohn- und Haushaltsmöbel
TAL-07	etabliertes/funktionierendes Sammel-/Rückführsystem	2	2	0	0	0	2	0	-2
TAL-08	gesetzliche Vorgaben zur Sammlung und Rückführung	2	2	0	-1	-1	0	1	-2
Lagerung									
TAL-09	gute Lagerfähigkeit	2	2	1	1	1	2	0	0
TAL-10	planbarer Lagerbestand (Wareneingang/-ausgang)	2	1	2	-1	-1	2	1	-2
TAL-11	gute Sortierbarkeit ausgebauter Module	2	1	2	1	1	2	0	-2
TAL-12	hohe Standardisierung der Module	2	0	0	1	2	2	0	-2
Geschäftsmodelle		1,88	0,75	0,43	-0,63	-0,63	1,63	1,38	-0,50
GEM-01	konstante und planbare Rücknahmemengen	2	1	2	-1	-1	2	1	-2
GEM-02	konstanter und planbarer Absatzmarkt	2	1	2	1	1	2	2	-1
GEM-03	etabliertes und verlässliches Rücknahmesystem hinsichtlich Rücknahme- und Absatzmenge (lebenszyklusübergreifende Produktverantwortung)	2	2	N/A	-1	-1	2	1	-2
GEM-04	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben)	2	2	0	-1	-1	0	2	-2
GEM-05	strukturierte Rahmenbedingungen (Gesetze, Vorgaben) des Absatzmarktes, wie z. B. Zulassungskriterien	2	0	1	-1	-1	2	2	0
GEM-06	Marktakzeptanz aufgearbeiteter Produkte	2	1	1	0	0	2	2	0
GEM-07	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch Neuprodukte	2	0	-1	-1	-1	1	1	1
GEM-08	Konkurrenzsituation im Absatzmarkt durch andere aufgearbeitete Produkte	1	-1	-2	-1	-1	2	0	2
Weitere Aspekte		0,75	0,50	0,75	0,25	0,25	1,75	1,75	1,25
OTH-01	Sicherheits- oder Ausfallrisiko durch aufgearbeitete Produkte	2	2	1	1	1	2	2	1
OTH-02	Markenrisiko (bei vorzeitigem Ausfall aufgearbeiteter Produkte)/Branding als aufgearbeitetes Produkt (B2C) (Qualitätswahrnehmung) [falls relevant]	0	0	2	-2	-2	2	2	1
OTH-03	Wertwahrnehmung aufgearbeiteter Produkte (Qualität von Up-, Down- und Recycling)	2	-1	1	0	0	2	2	1
OTH-04	gutes Angebot an qualifizierten Mitarbeitern	-1	1	-1	2	2	1	1	2

Das Beispiel mit Laptops und Desktop PCs zeigt beispielsweise, dass innerhalb dieser Produktkategorie grundsätzliche Ähnlichkeiten vorhanden sind. Insbesondere in den Bereichen der reversen Logistik, der Geschäftsmodelle und sonstigen Aspekte ist hier eine Gemeinsamkeit festzustellen. Beide Beispiele sind im Bereich der Elektrotechnik angesiedelt und verfügen somit über ähnliche Rahmenbedingungen. Gleichzeitig zeigen sie aber auch deutliche Unterschiede, insbesondere im Bereich des Produktdesigns. Aufgrund der höheren Integration ist die Identifikation von Modulen und Materialien bei Laptops komplexer als bei Desktop PCs. Dies beeinflusst wiederum die Austauschfähigkeit einzelner Komponenten, wodurch die Bewertung der Laptops entsprechend schlechter ausfällt. Sie liegt bei -0,23 im Vergleich zu 0,09 bei Desktop PCs.

Grundsätzlich zeigt sich, dass sich Remanufacturing vor allem bei eher teuren und modular aufgebauten sowie zerlegbaren Produkten lohnt. Bei diesen besteht bereits oft ein Ersatzteilmarkt. Die Reparatur- bzw. Aufarbeitungsindustrie hat es geschafft, sowohl Geschäftsmodelle zu entwickeln als auch die Produkteigenschaften positiv für das Remanufacturing umzusetzen bzw. zu nutzen.

Bei niedrigpreisigen Produkten muss ein solcher Markt in vielen Fällen noch geschaffen werden, dennoch ist es möglich, wie am Beispiel der Wasserzähler zu sehen (vgl. Abschnitt 3.3.6). Durch die Kooperation mit anderen Akteuren kann die Rückführung von Produkten gesichert werden. Das Produktdesign ermöglicht eine effiziente Aufarbeitung der gebrauchten Wasserzähler, welche dann wieder von den Ableseunternehmen an Endkunden vertrieben werden. Die Kunden unterscheiden dabei nicht zwischen neuen und aufgearbeiteten Produkten, da die Leistungsfähigkeit sichergestellt ist.

4 FÖRDERNDE UND HEMMENDE FAKTOREN FÜR DAS REMANUFACTURING

Der Weg von der linearen Produktnutzung hin zu einem geschlossenen Kreislauf ist oftmals eine große Herausforderung. Obwohl das Remanufacturing-Unternehmen ökonomische und ökologische Chancen bietet, kann es in manchen Fällen auch negative Effekte verursachen. Dementsprechend ist es für jedes Produkt erforderlich, eine systematische und umfassende Bewertung durchzuführen (vgl. Kapitel 3.1.2 und Kapitel 5.1). Hieraus lassen sich fördernde und hemmende Faktoren ableiten.

4.1 Treiber für das Remanufacturing

Die Wahrscheinlichkeit, dass das Remanufacturing positive Effekte erzielt, ist immer dann hoch, wenn die Produktgestaltung auf den Prinzipien der Ressourceneffizienzsteigerung, der Schließung von Stoffkreisläufen und Abfallvermeidung beruht. Mit Bezug auf das Produkt und technische Randbedingungen (vgl. Kapitel 2.1.2) lohnt sich Remanufacturing vor allem für Produkte mit folgenden Eigenschaften:

- Produkte, die aus kreislauffähigen Materialien bestehen,
- die auf toxische Stoffe verzichten,
- mit einer modularen Bauweise,
- die eine Demontagefreundlichkeit und einfache Zerlegbarkeit aufweisen,
- mit einer langen Beständigkeit von Materialien oder Bauteilen als Basis für längere und mehrfache Produktnutzungsdauer,
- mit einer einfachen Wartbarkeit und Reparierbarkeit.

Grundsätzlich sind Lebenszyklusbetrachtungen allgemein und Ökobilanzen im Besonderen für die ökologischen Aspekte erforderlich zur Identifikation, ob ein Produkt für das Remanufacturing geeignet ist (vgl. Kapitel 5.1). Die Ökobilanz quantifiziert dabei ökologische Effekte und das Potenzial an Ressourceneinsparungen. Die Lebenszyklusbetrachtung umfasst alle technischen und ggf. ökonomischen Aspekte des Produktlebenszyklus.

Neben Ökobilanzdaten für Material- oder Rohstoffaufbereitung beeinflussen ebenso Fertigungsprozesse die Umwelt. Auch Verfahren wie Sortieren, Demontieren oder Reparieren spielen eine wichtige Rolle. Nicht nur die direkten ökologischen Wirkungen und Ressourcenverbräuche der Einzelprozesse, sondern auch ihr Effekt über einen oder mehrere Produktlebenszyklen ist entscheidend. Beispielsweise kann die Auswahl eines neuen kreislauffähigen Materials zwar eine hohe Umweltbelastung bei der Gewinnung primärer Rohstoffe erzeugen, jedoch durch eine Gewichtsreduzierung Transportaufwendungen verringern. Darüber hinaus kann das neue Material durch seine Rückgewinnung die Umweltauswirkungen im Vergleich zur primären Rohstoffgewinnung senken. Dies kann für einzelne Materialien, Produktmodule oder gesamte Produkte gelten.

Um die Ressourceneffizienz eines neu hergestellten und eines wiederaufbereiteten Produkts vergleichen zu können, müssen folglich die jeweiligen Lebensphasen der beiden Produkte zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. Gegebenenfalls müssen auch weitere Lebensphasen des aufbereiteten Produkts berücksichtigt werden. Dabei kann entweder das Remanufacturing des gesamten Produkts oder es können lediglich wiederaufgearbeitete Bauteile, Module oder Komponenten betroffen sein.

Neben den technischen und prozessbedingten Aspekten leiten sich systemische und logistische Faktoren ab, die förderlich für das Remanufacturing sind, aber außerhalb der direkten ökobilanziellen Bewertungen liegen. Hierzu gehören gut funktionierende Sammel- und Rücknahmesysteme, die über die Zeit konstante Mengen von Altteilen mit möglichst gleichbleibender Qualität bereithalten. Darüber hinaus ist qualifiziertes Personal für die Überprüfung der Altteile erforderlich. Eine effektive Sammel- und Rücknahmelogistik inklusive der Lagerung, Sortierung und Transporte zwischen beteiligten Akteuren trägt zu einem nachhaltigen Remanufacturing bei.

Schließlich sind Geschäftsmodelle als zentrales Element wirtschaftlichen Agierens auch ausschlaggebende Faktoren für das Remanufacturing. Oftmals sind diese aber erst wahrnehmbar, wenn technische oder logistische Voraussetzungen geschaffen sind. Eine gut funktionierende Logistik wiederum kann ohne bereits existierende Geschäftsmodelle kaum finanziert werden. Dieses Dilemma lässt fehlende Geschäftsmodelle eher als Hemmnisse

erkennen. Wenn diese Modelle allerdings gefunden, beschrieben und darstellbar sind, ergeben sie einen starken Treiber und lösen so ein zirkuläres Produktdesign aus. Umgekehrt ist es eher unwahrscheinlich, dass sich aus einer Produktidee, die auf Zirkularität abzielt, automatisch ein geeignetes Geschäftsmodell ableiten lässt.

Eigene Bewertungsergebnisse aus Kapitel 3.3 zeigen deutlich, dass vorhandene Geschäftsmodelle eindeutig unterstützende Treiber für Remanufacturing sind. Ein Beispiel für ein funktionierendes Geschäftsmodell ist die Firma Lorenz mit dem Remanufacturing von Wasserzählern. Hier lassen sich kontinuierlich Produktverbesserungen vornehmen. Durch Kreativität und Mut zu neuen Geschäftsabläufen und Investitionen ließen sich vermeintliche Hemmnisse zum Remanufacturing aus dem Weg räumen. Ohne ein Geschäftsmodell fiele die Bewertung niedriger aus und würde als Hemmnis wahrgenommen werden, da sich aus den vorliegenden Produkteigenschaften offensichtlich kein zirkuläres Modell ableiten lässt.

Wenn noch keine Produktkreisläufe vorliegen, die einen Beweis für funktionierende Geschäftsmodelle darstellen, sind die wichtigsten Treiber Ideen, Kreativität und Mut, etwas an der Produkttechnologie und Logistik zu ändern, sodass nachhaltige Geschäftsmodelle entstehen können. Als Konsequenz daraus bieten sich eher weniger komplexe Produkte mit dem Potenzial zu kontinuierlichen Änderungen an, um eine schrittweise Kreislaufführung zu erreichen. Komplexe Produkte oder Produktsysteme stellen somit Hemmnisse dar (vgl. Kapitel 4.2).

Liegen bereits aufgearbeitete Produkte vor, die mit einem passenden Geschäftsmodell produziert, wiederaufgearbeitet und vermarktet werden, sollten auch Beschaffungs- und Absatzmärkte mit langfristigem und nachhaltigem Geschäftserfolg aufgebaut werden. Ein etablierter Absatzmarkt, ein Qualitätsvertrauen der Kunden und eine kontinuierliche Anpassung der Vermarktungs- und Vertriebskanäle an die Kundenanforderungen und die Marktsituation sind für das Remanufacturing fördernde Faktoren. Dies gilt auch bei Neuprodukten. Durch Qualitätszusagen oder Preisanpassungen kann ein gutes Markenverständnis für ein sekundäres Produkt entstehen. Dies führt dazu, dass aufgearbeitete Produkte nicht zwingend als niederqua-

litative oder günstigere Option gegenüber Neuprodukten verstanden werden, sondern als gleichwertige oder sogar bessere Produkte. Marken oder Unternehmen, welche sich zur Ressourceneffizienz und Schonung der Umwelt bekennen, dies mit Fakten belegen können und keine Abstriche in Qualität und Funktion vornehmen, tragen zur Stabilität und Nachhaltigkeit in einer modernen Gesellschaft bei. Insbesondere Europa ist abhängig von Rohstoffimporten und bezieht eine Vielzahl von Materialien und Werkstoffen durch Importe (siehe auch Ergebnisse zur Rohstoffkritikalität in Kapitel 5.3.2). Dazu, Produkte dennoch preisstabil und nach Bedarf anbieten zu können, tragen das Remanufacturing und die Kreislaufwirtschaft bei. Sie ermöglichen es Herstellern und Anbietern von Produkten, sich unabhängiger von nicht beeinflussbaren Beschaffungskosten und einer schwankenden Rohstoffverfügbarkeit zu machen.

4.2 Hemmnisse für das Remanufacturing

Einen hemmenden Faktor für das Remanufacturing stellt einerseits das Wechselspiel zwischen fehlenden technischen und logistischen Randbedingungen sowie mangelnden Geschäftsmodellen zur Kreislaufführung dar (vgl. Kapitel 4.1), andererseits spielen auch die äußeren Randbedingungen wie mangelnde Kundenakzeptanz oder hemmende Regulierungen und Auflagen eine Rolle.

In direktem Bezug auf Produkteigenschaften und technische Randbedingungen sind folgende Hemmnisse hervorzuheben:

- hohe Integration von Materialien und Produktfunktionen ohne Modularisierung, die einer Separierung in der Entsorgung entgegenstehen,
- hohe Integration und Miniaturisierung wie beispielsweise in der Elektronik, verknüpft mit fehlenden technischen Lösungen, alle Materialien separat zu recyceln,
- Einsatz unterschiedlichster Materialien, insbesondere bei geringen Materialströmen, die einer ökonomischen Logistik entgegenstehen,

- integrierte „Smartness“ oder Sensorik auf Chip-Ebene, die kurzlebiger als das Restprodukt ist, aber die Produktfunktion determiniert und nicht separierbar ist (unterschiedliche Funktionsdauer kombiniert in einem Produkt bei fehlender Modularisierung).

Zwar stehen Miniaturisierung und Dematerialisierung für Ressourceneffizienz, gleichzeitig muss aber festgestellt werden, dass sie dem Remanufacturing und der Kreislaufführung eher schaden. Dies liegt hauptsächlich an der erschwerten Austausch- und Aufarbeitungsfähigkeit, damit die Produkte oder Produktbauteile über mehrere Lebenszyklen genutzt werden können. Jedes einzelne Produktteil bestimmt die Lebensdauer des Gesamtprodukts. Somit definiert das Einzelteil mit der kürzesten Lebensdauer die Lebensdauer des gesamten Produkts, falls keine Vereinzelung, Demontage oder Reparaturmöglichkeit gegeben ist.

Neben dem Produktdesign sind folgende logistische und systembezogene Hemmnisse zu nennen:

- Verlust der Produktbindung nach dem Verkauf wie beispielsweise im Konsumentenmarkt,
- fehlende Rücknahmemöglichkeiten,
- Misch-Sammelsysteme bei hoher Produktvielfalt,
- komplizierte oder aufwändige Transporte oder Rücknahmelogistik,
- unplanbare oder schwer kalkulierbare Rücknahmemengen,
- Konflikte oder unterschiedliche Interessen in wertschöpfungskettenübergreifender Zusammenarbeit,
- Informationsdefizite, unzureichende Transparenz in der Wertschöpfungskette.

Bei der vergleichenden Betrachtung der Lebenszyklen von neuen und aufgearbeiteten Produkten zeigt sich, dass nicht einzelne Prozesse oder Materialien miteinander verglichen werden sollten, sondern alle Effekte über den gesamten Lebenszyklus (siehe Kapitel 5). Hieraus entstehen einige Hemmnisse, da oftmals Hersteller oder Remanufacturer nach dem Verkauf keinen Produktbezug mehr haben. Somit sind beide entweder auf externe Sammelsysteme angewiesen oder müssten diese selbst im Markt einführen, was üblicherweise durch Einzelakteure kaum darstellbar ist. Entweder können Produkte gar nicht identifiziert werden, sind zerstört oder so variantenreich, dass eine Aufarbeitung zu unterschiedlich und zu komplex ist. Dies verhindert auch den Aufbau eines betriebswirtschaftlich tragfähigen Modells.

Auch können die direkten Kosten der Logistik bezogen auf die einzusammelnden Produktwerte ein Hemmnis darstellen. Als Beispiele sind Sperrgut oder Produkte mit sehr geringen Materialmengen je Einheit zu nennen, insbesondere wenn sie weit verteilt sind.

Wie aus Kapitel 4.1 hergeleitet, stellen betriebswirtschaftliche Aspekte die größten Hemmnisse dar. Sie motivieren selten per se dazu, Investitionen und Änderungen an Technik oder Logistik hin zu einer Kreislauffähigkeit vorzunehmen. Die Aspekte sind im Einzelnen:

- fehlende Strukturen in Unternehmen, wie z. B. keine Rückwärtslogistik, Lagerkapazitäten oder Eingangsproduktprüfung,
- unklare Verantwortlichkeiten,
- fehlendes Fachpersonal oder mangelnde Umschulungsmaßnahmen,
- fehlende Akzeptanz gegenüber wiederaufgearbeiteten Altprodukten,
- fehlende Anreize für Unternehmen, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln,
- niedrige Primärrohstoffkosten oder nicht wahrgenommene Rohstoffrisiken,

- Risiko des Produktkannibalismus, indem zirkuläre Produkte Marktanteile von Neuprodukten verringern,
- negative Aspekte bei der bilanziellen Darstellung,
- rechtliche Barrieren.

Je einfacher Produkte und Produktsysteme gestaltet sind, desto eher lassen sich Geschäftsmodelle erkennen. Aber der Markttrend läuft im Allgemeinen hin zu höherer Komplexität, mehr „Smartness“ und Funktionsintegration, sodass Wertschöpfungsketten sowie beteiligte Akteure und Abläufe in Produktlebenszyklen komplexer und vielschichtiger werden.

Herausforderungen ergeben sich auf unterschiedlichsten Ebenen. Diese erstrecken sich von kognitiven Barrieren bei Verbrauchern über operative Barrieren bei Unternehmen bis hin zu den regulatorischen Hemmnissen auf volkswirtschaftlicher Ebene und beeinflussen sich oft gegenseitig[63]. Zwischen technischen Möglichkeiten, wirtschaftlicher Rentabilität, Qualität und Produktfunktion sowie ökologischen Gesichtspunkten besteht häufig ein Zielkonflikt. Operative Strukturen in und zwischen Unternehmen benötigen Veränderung. Hierzu müssen neue Fähigkeiten aufgebaut werden, um die Zielkonflikte aus Lebenszyklussicht auflösen zu können. Auch dies erfordert Ressourcen, Expertise und breite Akzeptanz der Mitwirkenden und stellt oft ein größeres Hemmnis dar als die Überwindung technischer oder rein finanzieller Hürden. Speziell für etablierte Unternehmen sind diese Aspekte und Zielkonflikte eine große Herausforderung, da dies mit Veränderungen in Organisationsstrukturen einhergehen muss[64]. Somit haben tendenziell flexible und wandlungsfähige KMUs mehr Chancen, erfolgreiches Remanufacturing umzusetzen, als große Unternehmen, so lange nicht die ökonomischen Hürden für KMUs zu hoch sind.

[63] Vgl. Fasko, R. (2015), S. 3 ff. & Scheelhaase, T. und Zinke, G. (2016), S. 51 ff. & Weber, T. und Stuchtey, M. (2018), S. 17 ff.

[64] Vgl. Weber, T. und Stuchtey, M. (2018), S. 18.

Nach der Circular Economy Initiative Deutschland (CEID)[65] ist auch ein systemrelevantes Hemmnis hervorzuheben. Die finanzielle Beurteilung von zirkulären Geschäftsmodellen fällt oft zu niedrig aus, da die üblichen Bewertungs- und Risikomodelle sowie Indikatoren des betrieblichen Finanzwesens zentrale Konzepte des Remanufacturing nicht abbilden können. Beispielsweise basieren derzeitige Bewertungsmethoden für Geschäftsmodelle in der Regel auf klassischen Zahlenwerten wie dem Anlagevermögen. Für das Remanufacturing ist anzunehmen, dass der unternehmerische Wert weniger über das Anlagevermögen generiert wird. Somit spiegeln aktuelle Kennzahlen die Bewertung neuer zirkulärer Geschäftsmodelle unzureichend wider.

Die kognitiven Barrieren des Marktes bzw. der Kunden stellen ein weiteres Hemmnis dar. Geringe Nutzerakzeptanz oder mangelnde Nachfrage nach wiederaufgearbeiteten Produkten setzt den Unternehmen keine Anreize, solche zu entwickeln[66]. Zusätzlich müsste jeder Akteur in der gesamten Wertschöpfungskette seinen Beitrag leisten. Hierfür müssen Zielkonflikte übergreifend von allen am Produktlebenszyklus beteiligten Unternehmen überwunden werden. Oft kann dabei nicht jedes Unternehmen den direkten Nutzen für sich generieren. Um diesen Hemmnissen entgegenzuwirken, kann ein Werttransfer hilfreich sein, der aus fiskalpolitischer Sicht und somit auch von der Politik initiiert werden muss.

Die Systemebene wie Steuersystem, Politik oder Gesetze stellt somit ebenfalls ein weiteres Hemmnis dar, ist aber durch einzelne Akteure nur wenig beeinflussbar. Derzeitige Regelungen und Normen setzen unzureichende Anreize für zirkuläres Wirtschaften. Beispiele sind die starke Besteuerung der Arbeit und die im Verhältnis geringe Besteuerung der Ressourcen. Diese fördern Konsum und ergeben einen Nachteil für Geschäftsmodelle wie Reparatur oder Remanufacturing. Außerhalb des legislativen Rahmens fehlen in vielen Fällen akzeptierte (Industrie-)Normen und Standards, die sektorübergreifend eine verlässliche Anwendung innovativer Geschäftsmodelle ermöglichen. Darüber hinaus existieren

[65] Vgl. Weber, T. und Stuchtey, M. (2018), S. 18 – 19.
[66] Vgl. Scheelhaase, T. und Zinke, G. (2016), S. 52 – 53.

- zahlreiche Wissenslücken zu zirkulären Konzepten in Theorie und Praxis,
- eine unzureichende Verbreitung des vorhandenen Wissens in der Gesellschaft und
- eine starke, kulturelle Barriere, wie z. B. Statussymbole für Konsumenten[67].

Um diese Barrieren zu überwinden, ist ein Wertewandel hin zu nachhaltigen Konsummustern mit einem Qualitätsverständnis erforderlich, bei dem das Attribut „neu" nicht zwingend ein Qualitätskriterium ist. Als ein Beispiel für kulturelle Barrieren dient das Trennen von Müll im privaten Bereich. Dies schließt die Entsorgung alter Elektrogeräte über den Hausmüll aus. Dies führt dazu, dass diese jahrelang als wertvolle Materialien ungenutzt in Schränken liegen, da die Hürde, diese der Wiederverwendung oder -verwertung zuzuführen, zu hoch ist[68]. Wenn der Wunsch in der Gesellschaft und ein entsprechendes Verhalten zur Kreislaufwirtschaft gegeben wären, lägen die Hürden der Rückführung nicht zu hoch oder es ergäben sich neue Ansätze zu reverser Logistik und zum verbesserten Produktdesign, um vermehrt Remanufacturing realisieren zu können.

Abschließend sind Hemmnisse durch international vernetzte Handelsketten zu nennen. Diese ziehen z. B. fehlende oder uneinheitliche Standards nach sich. Auch sind unterschiedliche Wertewahrnehmungen und ökonomische Randbedingungen gegeben, die von einzelnen Unternehmen oder Regierungen nicht im Alleingang beeinflusst werden können[69].

[67] Vgl. Weber, T. und Stuchtey, M. (2018), S. 20.

[68] Vgl. Scheelhaase, T. und Zinke, G. (2016), S. 53 & Weber, T. und Stuchtey, M. (2018), S. 18.

[69] Vgl. Ionaşcu, I. und Ionaşcu, M. (2018), S. 357 ff. & Weber, T. und Stuchtey, M. (2018), S. 356 – 372

4.3 Vorgehen zur Einführung eines zirkulären Produktsystems

Zusammenfassend stellt sich zum Thema Treiber und Hemmnisse des Remanufacturing die Frage, wie Unternehmen, insbesondere KMU, vorgehen können, falls sie zirkuläre Geschäftsmodelle aufbauen und Remanufacturing entwickeln möchten.

Erkenntnisse aus Kapitel 4.1 und 4.2 lassen darauf schließen, dass die größte Hürde im Wechselspiel zwischen nicht vorhandenen zirkulären Produkteigenschaften und fehlenden bzw. nicht ersichtlichen Geschäftsmodellen liegt. Das eine kann ohne das andere schwer entwickelt werden.

Zudem hat es den Anschein, dass weniger komplexe Produkte oder Produktsysteme einfacher schrittweise zirkulär werden können. Dies leitet sich daraus ab, dass die Hürden bei zu hoher Komplexität und zu vielen beteiligten Akteuren schlicht zu hoch sind, um einen gangbaren Weg für neue Geschäftsmodelle zu definieren. Dennoch sind sie möglich, wie das positiv bewertete Remanufacturing von Flugzeugtriebwerken zeigt. Bei der Einführung von Geschäftsmodellen müssen diese aber einfach und verständlich sein, um Investoren schnell überzeugen zu können, aber auch mit Fakten und Argumenten untermauert werden, damit sie glaubhaft sind. Dem steht grundsätzlich die Komplexität von Produkt- und Systemlebenszyklen entgegen. Insofern lässt sich vermuten, dass ein Einstieg in das Thema über den üblichen Weg des Findens und Definierens eines Geschäftsmodells und im Nachgang dazu die Realisierung durch Produkte und Systeme eher selten zum Erfolg führen.

Zahlreiche eigene praktische Erfahrungen hinsichtlich Lebenszyklusanalysen lassen folgende Schritte als gangbaren Weg hin zu zirkulären Produktsystemen definieren (Abbildung 9). Dieser methodische Ablauf kann auch bei komplexen Produktsystemen angewendet werden. Schlussendlich zählen die Eingängigkeit und Argumentationsgrundlage zu den Geschäftsmodellen und diese können entsprechend aus der Komplexität herausgeschnitten sowie logisch und systematisch vermittelt werden.

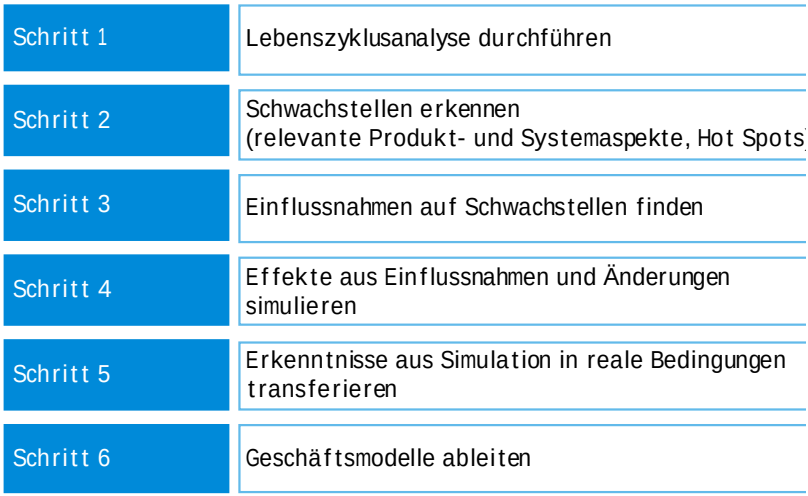

Abbildung 9: Praktische Anleitung zur Einführung eines zirkulären Produktsystems, der Sechs-Schritte-Ablaufplan

Die Schritte enthalten im Einzelnen Folgendes:

(1) Im ersten Schritt soll eine Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz eines Produkts oder Produktsystems durchgeführt werden. Die Komplexität ist dabei unerheblich und zieht lediglich den notwendigen Aufwand und Zeitbedarf zur Durchführung einer solchen Studie nach sich. Moderne LCA-Werkzeuge und entsprechende Datenbanken decken nahezu alle gängigen Materialien, Energien, Logistik und Fertigungsprozesse ab.

(2) Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse sollten bezüglich sämtlicher Detailtiefen des Produktmodells und zu allen logistischen und systemrelevanten Aspekten untersucht werden. Dabei sind die absoluten Zahlen der errechneten Indikatoren weniger relevant, sondern mehr die Verhältnisse und Herkunft (Umweltaspekte) der einzelnen Beiträge über den Lebensweg. Diese sogenannte Hot-Spot-Analyse (Schwachstellenanalyse) anhand ökologischer Indikatoren bietet den Vorteil, dass unterschiedliche technische und systemische Aspekte miteinander verglichen werden können. Beispielsweise kann der Energieverbrauch in kWh, Emissionen von Transporten in km oder Mengen von eingesetz-

tem Material in kg anhand des Indikators Treibhauspotenzial in derselben Einheit verglichen werden. Die Werte der Einheit Treibhauspotenzial können miteinander oder innerhalb eines Lebenszyklusabschnittes oder in Bezug zum gesamten Lebenszyklus relativ verglichen werden und somit kann ihre Signifikanz erkannt werden.

(3) Mit Hilfe der Indikatoren der Lebenszyklusanalyse werden die Hot Spots dahingehend untersucht, welche Beiträge dominieren und wie Einfluss auf diese genommen werden kann. Beispielsweise sind Simulationen mit Hilfe moderner LCA-Werkzeuge denkbar, um Effekte von Materialänderungen und deren Einfluss auf Energie, Logistik und Fertigungsprozesse zu ermitteln.

(4) Die Analyse und Simulation von Einflussnahmen führen zu einer Liste möglicher Maßnahmen, die eine Verbesserung des Systems nach sich ziehen können. Als Verbesserung sind z. B. die Verminderung von Treibhausgasmengen oder ein geringerer Ressourceneinsatz zu verstehen. Diese ökologischen Aspekte erlauben es, anhand der Indikatoren Produkte oder Systeme objektiv zu bewerten gegenüber subjektiven Indikatoren wie Gewinnmaximierung für einzelne Akteure des Lebenszyklus oder Preisminimierung ohne Rücksicht auf Qualität.

(5) Über Methoden der Lösungsfindung und Kreativitätsförderung können Möglichkeiten der Realisierung gefunden und Geschäftsmodelle entwickelt werden. Beispiele zu Kreativitätstechniken sind das Brainstorming (laute Technik)[70] oder die 635-Methode (ruhige Technik)[71]. Mit deren Hilfe lassen sich u. a. neue Ideen im Zuge des „Design-Thinking"-Ansatzes[72] finden, die auf Basis der Grundprinzipien Team, Raum und Prozess beruhen. Aber auch diskursive Methoden sind denkbar, wie der Morphologische Kasten[73] oder die Relevanzbaumanalyse[74], die eher systematisch durch logisch ablaufende Schritte Ideenfindungs- und

[70] Vgl. Clark, Ch. H. (1989), S. 10 ff.
[71] Vgl. Higgins, J. M. und Wiese, G. G. (1996), S. 10 ff.
[72] Vgl. Sachse, P. und Specker, A. (1999), S. 10 ff.
[73] Vgl. Zwicky, F. (1966), S. 8 ff.
[74] Vgl. Schmidt, G. (2000), S. 10 ff.

Problemlösungstechniken darstellen. Darüber hinaus sind Kombinationen aus beiden Technikansätzen zu nennen, wie beispielsweise die Walt-Disney-Methode[75], bei der ein Problem oder eine Idee aus der Perspektive unterschiedlicher Rollen betrachtet wird, wie aus der Sicht des Realisten, Kritikers und Träumers. Die Liste geeigneter Methoden ist lang und die Auswahl vom spezifischen Fall abhängig. Die Intention hierbei ist es, sämtliche Optionen anzudenken oder zuzulassen und sich nicht durch Zwänge der gegebenen Randbedingungen des jeweiligen Ist-Standes einzuschränken.

(6) Die vielversprechendsten Ansätze und Umsetzungswege hin zu neuen zirkulären Geschäftsmodellen aus Schritt 5 werden herausgesucht und so aufbereitet, dass sie durch Änderungen der Produkte, Logistik oder Lebenswegabschnitte realisiert werden. Auch können hiermit Investoren gefunden werden, denn es liegt den gefundenen Geschäftsmodellen eine nachvollziehbare und stichhaltige, faktenbasierte Analytik zugrunde.

[75] Vgl. Dilts, R. B.; Epstein, T. und Dilts, R. W. (1994), S. 9 ff.

5 ÖKOBILANZ, KRITIKALITÄT UND KOSTENBEWERTUNG

5.1 Einführung in das Thema Ökobilanz

Grundsätzlich ist eine Ökobilanz ein Instrument zur Erfassung, Bewertung und Abbildung von Umweltauswirkungen. Sie bildet eine Grundlage für Vergleiche, Zielsetzungen oder interne und externe Kommunikation. Nach DIN EN ISO 14040[76] umfasst eine Ökobilanz die Festlegung des Ziel- und Untersuchungsrahmens, die Erstellung der Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung sowie die abschließende Interpretation (vgl. Abbildung 10).

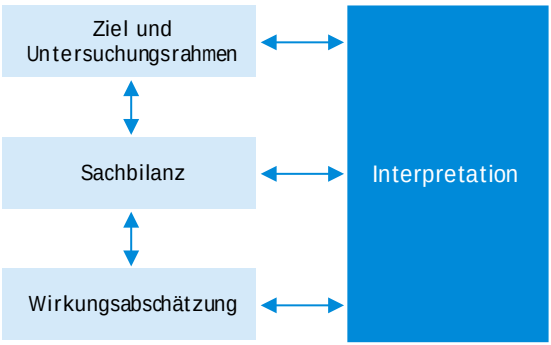

Abbildung 10: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040

Die Festlegung des Ziel- und Untersuchungsrahmens ist maßgeblich für die weiteren Arbeiten, da hier die zu betrachtenden Systemabgrenzungen definiert werden. In der anschließenden Sachbilanz werden alle benötigten Inputs (Rohstoff- und Energieflüsse) sowie Outputs (Abfälle, Emissionen etc.) erfasst. Je nach definierten Systemgrenzen erfolgt dies über alle Lebensphasen des zu betrachtenden Produkts, also von „der Wiege bis zur Bahre“ (Cradle-to-Grave). In der Wirkungsabschätzung werden jedem Bestandteil der Sachbilanz ihre Umweltwirkungen mit Hilfe von Wirkungskategorien (z. B. Treibhauspotenzial oder stratosphärischer Ozonabbau) zugewiesen. Die abschließende Interpretation identifiziert die wichtigsten Themen, gibt Handlungsempfehlungen und behandelt mögliche Einschränkungen der Analyse.

[76] DIN EN ISO 14040:2006.

Diese und alle weiteren Schritte der Ökobilanz erfolgen in Anlehnung an die Vorgaben der DIN EN ISO 14040 „Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen“[77] sowie der DIN EN ISO 14044 „Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen“[78].

Die Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens beinhaltet beispielsweise (basierend auf DIN EN ISO 14044):

- die Festlegung der Fragestellung und des Ziels der Untersuchung, um ein klares Verständnis der Inhalte zu sichern,
- die Zielgruppe der Ökobilanzergebnisse (z. B. KMU), um deutlich zu machen, wer Empfänger oder Nutzer sein kann oder sollte,
- die Beschreibung der untersuchten Produkte und des untersuchten Systems,
- die Definition der funktionellen Einheit, die einen großen Einfluss auf das Ergebnis hat, da sie den quantifizierten Nutzen definiert, auf den sich alle zu errechnenden Umweltwirkungsindikatoren beziehen werden,
- die Festlegung der Systemgrenzen, um zu definieren, welche Prozessschritte berücksichtigt werden und welche nicht zum Ergebnis beitragen bzw. unberücksichtigt bleiben,
- die Anforderungen an die Datenqualität, Detailtiefe und den Umfang, um einen Eindruck der Qualität und Verlässlichkeit der Ergebnisse vermitteln zu können,
- die Festlegung grundlegender Annahmen, z. B. zu einzelnen Lebenszyklusphasen, um die Stabilität und Gültigkeit der Ergebnisse beurteilen zu können,
- den regionalen und zeitlichen Bezug, um die Übertragbarkeit auf andere Bereiche beurteilen zu können,

[77] **DIN EN ISO 14040:2006.**
[78] **DIN EN ISO 14044:2006.**

- den Umgang mit Datenlücken, Abschneidekriterien, Allokationsmethoden etc., um die Qualität, Stabilität und Gültigkeit der Ergebnisse beurteilen zu können,
- die Festlegung der zu betrachtenden Umweltwirkungskategorien,
- das Auswertungsverfahren und die Ergebnisdarstellung, um ein besseres Verständnis der Ergebnisse sicherzustellen, sowie
- die Auswahl von Parametern und Einflussfaktoren für die Sensitivitätsanalyse, um deren Relevanz beurteilen zu können.

Mit der Definition der funktionellen Einheit und des Untersuchungsrahmens werden die Rahmenbedingungen für die Studie festgelegt. Diese Festlegungen bleiben über den gesamten Verlauf der Studie bestehen. Diese Iterationsschleifen sind auch laut Norm DIN EN ISO 14040/44 bei Ökobilanzen üblich und dienen vor allem der harmonischen Abstimmung der Ziel- und Rahmenfestlegung mit dem endgültigen Ergebnis, welches immer von gewonnenen Erkenntnissen, verfügbaren Daten und notwendigerweise getroffenen Annahmen abhängt.

Analog zur ökologischen Bewertung erfolgt die ökonomische Analyse auf Grundlage desselben Untersuchungsrahmens und der gleichen funktionellen Einheit. Diese stellt die Konsistenz der ökologischen und ökonomischen Analyse sicher.

5.2 Ziel und Rahmendefinition der vergleichenden Lebenszyklusanalysen

5.2.1 Ziel der vergleichenden Lebenszyklusanalysen

Ziel der Lebenszyklusanalysen (Ökobilanzierung) ist der Vergleich der Umweltwirkungen von neu hergestellten und aufgearbeiteten Wasserzählern der Firma Lorenz GmbH & Co. KG. Die Durchführung der Ökobilanzierung und anschließende Bewertung erfolgen nach DIN EN ISO 14040[79],

[79] DIN EN ISO 14040:2006.

DIN EN ISO 14044[80] und gemäß VDI 4600[81] sowie VDI 4800 Blatt 1[82] und Blatt 2[83]. Dies ermöglicht es, die Potenziale zur Reduzierung von Umweltwirkungen und des Ressourcenbedarfes durch Remanufacturing quantitativ aufzuzeigen.

Neben Umweltwirkungen werden im Rahmen der Untersuchungen die Rohstoffkritikalität und ökonomische Aspekte bewertet.

Zielgruppe der Studie sind Maschinen- und Anlagenhersteller, Produktnutzer sowie Beratungs- und Forschungsinstitutionen. Die Erkenntnisse aus der Studie können von Initiativen und Verbänden sowie Einrichtungen des Bundes, der Länder und deren Vertretern als Informationsquelle verwendet werden.

5.2.2 Untersuchungsrahmen

5.2.2.1 Untersuchte Produkte

Gegenstand der Untersuchung sind Wasserzähler der Firma Lorenz GmbH & Co. KG. Lorenz bietet Aufputzzähler (Flügelradzähler) und Unterputzzähler (Messkapseln) an. Beide Zählerarten unterscheiden sich zwar im Aufbau, ihre Funktion ist aber grundsätzlich gleich: Sie messen die durchfließende Menge an Wasser. Beide Zählervarianten werden von Lorenz aufgearbeitet und wieder vertrieben. Von großer Relevanz ist dabei die Eichung der Zähler. Nur so kann garantiert werden, dass die gemessene Durchflussmenge korrekt ist. Die Eichung eines Warmwasserzählers ist fünf Jahre lang gültig, anschließend muss der Zähler getauscht oder neu geeicht werden. In dieser Studie werden Aufputzzähler (Abbildung 11) untersucht.

[80] DIN EN ISO 14040:2006.
[81] VDI 4600 Blatt 1:2015-08.
[82] VDI 4800 Blatt 1:2016-02.
[83] VDI 4800 Blatt 2:2018-03.

Abbildung 11: Aufputzzähler der Firma Lorenz

5.2.2.2 Funktionsbeschreibung und Definition der funktionellen Einheit

Die Funktion von Wasserzählern ist die Erfassung des Volumens der durchgeflossenen Wassermenge zur Verbrauchserfassung. Um die Wassermengen korrekt zu erfassen, müssen Wasserzähler regelmäßig geeicht werden. Die Eichung von Warmwasserzählern ist fünf Jahre lang gültig, die von Kaltwasserzählern sechs Jahre. Nach Ablauf der Eichzeit muss das Gerät getauscht und neu geeicht werden.

Abgeleitet aus dieser Funktion wird die funktionelle Einheit definiert als die geeichte Erfassung der durchgeflossenen Wassermenge über einen Zeitraum von fünf Jahren.

Die Funktion der geeichten Erfassung kann durch neu hergestellte wie auch aufgearbeitete Wasserzähler erfolgen, solange sie über eine gültige Eichung verfügen.

5.2.2.3 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen beinhalten die Prozessabläufe zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung von neuen und aufgearbeiteten Wasserzählern. Abbildung 12 und Abbildung 13 stellen die Systemgrenzen der Lebenszyklen beider betrachteten Systeme dar.

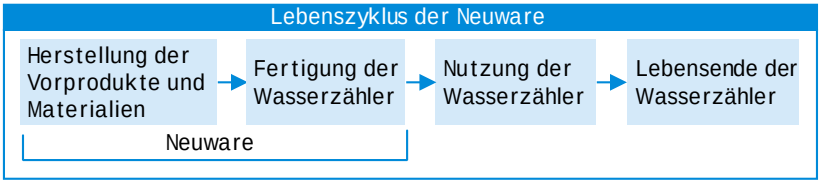

Abbildung 12: Systemgrenzen des Lebenszyklus von neu hergestellten Wasserzählern

Es zeigt sich deutlich der in Kapitel 1 dargestellte lineare Ansatz (Abbildung 12) gegenüber dem Produktkreislauf des Remanufacturing-Ansatzes (Abbildung 13).

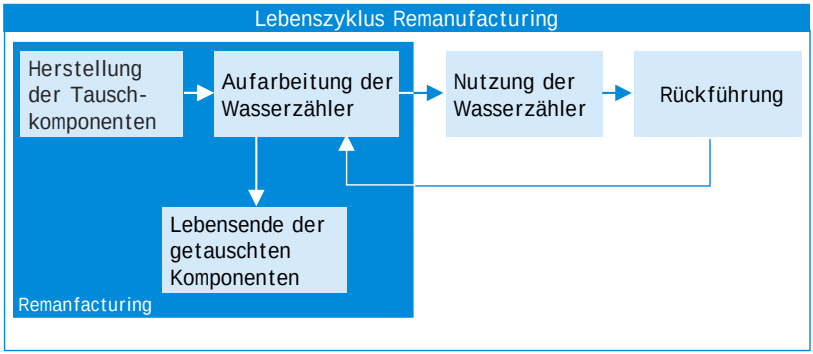

Abbildung 13: Systemgrenzen des Lebenszyklus von aufgearbeiteten Wasserzählern

Die Prozessschritte der Herstellung eines neuen Zählers stellt Abbildung 14 im Detail dar. Nach Eingang werden die Materialien von Angestellten der Firma Lorenz geprüft (Wareneingang A-I). Danach werden die Messingteile bearbeitet (A-II). Die Elektronik wird mit Software bespielt (A-III). Anschließend werden die Zähler zusammengebaut (A-IV). Die fertigen Wasserzähler werden geprüft und geeicht (A-V). Defekte oder ungenaue Zähler werden im Rahmen der Qualitätssicherung aussortiert und ggf. aufgearbeitet (A-VI). Die geeichten Zähler werden durch Pasteurisierung gereinigt und desinfiziert und können danach ausgeliefert werden.

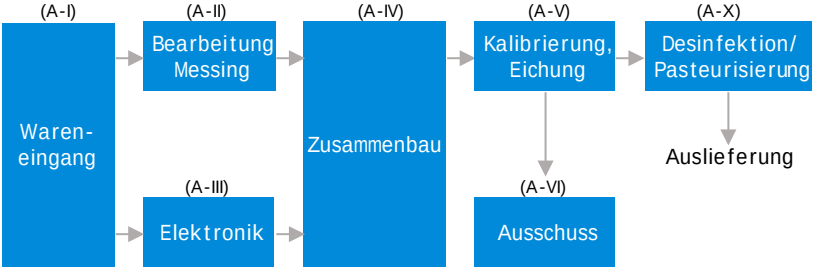

Abbildung 14: Prozessablauf zur Herstellung eines neuen Wasserzählers

Nach dem Gebrauch, üblicherweise nach Ablauf der Eichfrist, werden die Wasserzähler beim Kunden ausgetauscht. Im Falle des Remanufacturing durch die Firma Lorenz werden diese für die Aufarbeitung zurückgenommen. Die zurückgenommenen Wasserzähler können entweder eine einfache oder eine umfassendere Aufarbeitung erfahren.

Die einfache Aufarbeitung der Wasserzähler ist in Abbildung 15 detailliert dargestellt. Die Zähler werden überprüft und in Abhängigkeit von ihrem Zustand aufgearbeitet (B-I). Dazu müssen die Zähler lediglich gereinigt werden (B-II). Anschließend werden sie ohne weitere Aufarbeitungsschritte neu geeicht und desinfiziert und wieder ausgeliefert (B-IV, B-X). Bei einem Teil der Wasserzähler muss die Hydraulik getauscht werden (B-III). Dazu wird die Haube abgestochen und die Hydraulik anschließend mechanisch gereinigt. Danach kann die Hydraulik wiederverwendet werden.

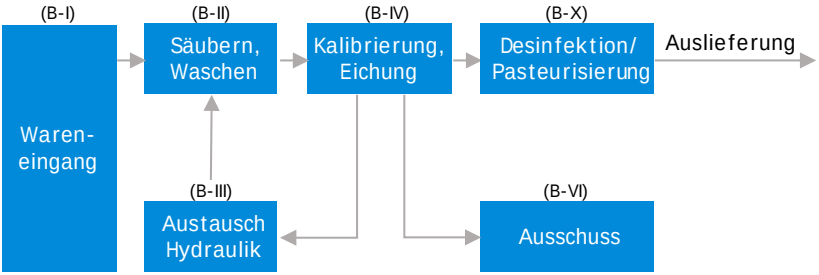

Abbildung 15: Prozessablauf zur einfachen Aufarbeitung eines Wasserzählers

Rund ein Viertel der zurückgenommenen Zähler muss aufwändiger aufgearbeitet werden. Abbildung 16 stellt den umfangreicheren Prozessablauf der Aufarbeitung von Wasserzählern im Detail dar. Die Schritte C-I bis C-IV aus Abbildung 16 entsprechen analog den Schritten Säubern und Austausch der Hydraulik aus Abbildung 15. Danach schließen sich allerdings je nach Zustand weitere Aufarbeitungsschritte an. Diese umfassen: Austausch der Haube (C-V) und ggf. des Ziffernblatts, des Gerätenummernschilds, des Datamatrix-Codes und des Konformitätskennzeichen (C-VI). Darüber hinaus ist eine elektrische Prüfung der Elektronik und Funkeinheit nötig. Unter Umständen muss ein Software-Update durchgeführt oder die Elektronik sogar ganz getauscht werden. (C-VII). Je nach Zustand kann auch ein Batteriewechsel nötig sein (C-VIII). Danach müssen die Wasserzähler kalibriert und geeicht werden (C-IX). Dies kann zu einem sehr geringen Ausschuss (C-XI) führen, welcher sich bei aufgearbeiteten Produkten nicht von Neuprodukten unterscheidet. Bevor die Ware ausgeliefert werden kann, müssen die Wasserzähler abschließend noch desinfiziert werden (C-X).

Je nach Zustand durchlaufen nicht alle Wasserzähler sämtliche Prozessschritte. Nur rund 10 % aller rückgeführten Zähler durchlaufen alle Aufarbeitungsschritte inklusive Batteriewechsel.

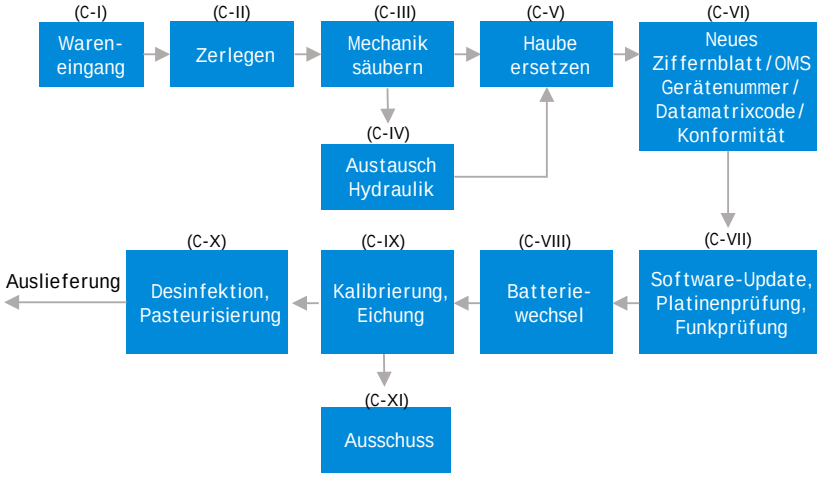

Abbildung 16: Prozessablauf zur aufwändigen Aufarbeitung eines Wasserzählers

Die Entfernung für die Auslieferung und Rückführung der Wasserzähler ist für alle Fälle identisch und wird auf 145 km festgelegt. Dies entspricht der durchschnittlichen Transportentfernung für Güter in Deutschland[84].

Die thermische Energie für die Desinfektion wird mit Erdgas abgebildet, für elektrischen Strom wird ein deutscher Netzmix angesetzt. Im Zuge der Szenarienanalysen (Kapitel 5.3.4) erfolgt eine Variation der Energiesysteme, welche die besondere Situation der Firma Lorenz mit Nutzung von Biogas und Abwärme aufzeigt.

Durch zusätzliche Prozessschritte für die Aufarbeitung ergeben sich Änderungen im Ressourcenbedarf, in den Umweltwirkungen und bei den Kosten. Im Rahmen dieser Studie werden die Umweltwirkungen einer durchschnittlichen Aufarbeitung als Basisfall betrachtet. Die durchschnittliche Aufarbeitung bezeichnet dabei die bei der Firma Lorenz anfallenden Aufarbeitungsschritte. Dabei durchlaufen 75 % der Wasserzähler eine einfache Aufarbeitung und die verbleibenden 25 % eine umfangreichere. Analysen unterschiedlicher Aufarbeitungen erfolgen im Rahmen der Szenarioanalysen (Kapitel 5.3.4).

5.2.3 Sachbilanz

5.2.3.1 Modelle, Allokation, Abschneidekriterien, Wirkungsabschätzung

Zur Erstellung der Ökobilanzmodelle werden die GaBi Software und zugehörige Datenbanken[85] genutzt. Es werden Datensätze für Deutschland verwendet, da die Herstellung, Aufarbeitung und Nutzung der Wasserzähler in Deutschland erfolgen. Für die als Lagerstein verwendeten Saphire sind keine Datensätze verfügbar. Zur Abschätzung wird der Datensatz für die Förderung von Gold durch eine ökonomische Allokation modifiziert, da hier vergleichbar aufwändige Förderprozesse wie bei Edelsteinen angenommen werden können. Der Golddatensatz wird hierbei linear skaliert mit einem Faktor, der sich aus dem Vergleich der durchschnittlichen Preise für Gold und Sa-

[84] Vgl. Hütter, A. (2016), S. 48.
[85] Sphera (2020b).

phire ergibt. Darüber hinaus werden keine weiteren Allokationen durchgeführt, da im betrachteten Vordergrundsystem keine Koppelproduktion auftritt.

Entsprechend den Vorgaben von VDI 4800 Blatt 1[86] werden Abfälle, die in einem nachfolgenden Produktsystem verwertet werden, bis zu ihrer Erfassung betrachtet. Zu beseitigende Abfälle werden im betrachteten System erfasst. Für Prozesse innerhalb der Systemgrenzen werden alle verfügbaren Energie- und Stoffstromdaten aufgenommen.

Für die Auswertung der Ergebnisse werden folgende Indikatoren verwendet:

- Der **„Kumulierte Energieaufwand" (KEA)** als Bewertungsindikator des Energieaufwands: Die Durchführung der Bewertung richtet sich nach der VDI-Richtlinie VDI 4600[87].
- Der **„Kumulierte Rohstoffaufwand" (KRA)** als Bewertungsindikator des Rohstoffaufwands: Die Durchführung der Bewertung richtet sich nach der VDI-Richtlinie VDI 4800 Blatt 2[88].
- Die **Flächeninanspruchnahme**, unterteilt in Siedlungs- und Landwirtschaftsflächen, folgt den Vorgaben der VDI-Richtlinie VDI 4800 Blatt 2[89].
- Die **Treibhausgasemissionen** in CO_2-Äquivalenten: Die Durchführung der Bewertung richtet sich nach dem IPCC-Bericht aus dem Jahr 2013[90].
- **Wasser**: Der Blauwasserverbrauch findet entsprechend den Vorgaben der VDI-Richtlinie VDI 4800 Blatt 2[91] statt.

Ergänzend wird eine Bewertung der Versorgungskritikalität der in der Sachbilanz erhobenen Rohstoffe und Materialien durchgeführt. Die Bewertung

[86] VDI 4800 Blatt 1:2016-02.
[87] VDI 4600 Blatt 1:2015-08.
[88] VDI 4800 Blatt 2:2018-03.
[89] VDI 4800 Blatt 2:2018-03.
[90] IPCC (2013).
[91] VDI 4800 Blatt 2:2018-03.

erfolgt nach der VDI-Richtlinie VDI 4800 Blatt 2[92]. Es schließt sich eine ökonomische Betrachtung der Lebenszyklen an, die sich in Systemgrenzen und Bezugssystem nach den Festlegungen und Beschreibungen der ökologischen Bewertung richtet (siehe Kapitel 5.2.3.4).

5.2.3.2 Datenaufnahme und Sachbilanzgrößen für die ökologische Bewertung

Die Datenaufnahme für die Herstellung und Aufarbeitung der Wasserzähler erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der Firma Lorenz GmbH & Co. KG in Ingstetten (Schelklingen). Nach dem aktuellen Kenntnisstand ist Lorenz die einzige Firma in Deutschland, die Wasserzähler sowohl herstellt als auch aufarbeitet.

Zur Datenerhebung wurde ein Prozessablauf entworfen und mit der Firma Lorenz abgestimmt (vgl. Kapitel 5.2.2.3). Alle Inputs und Outputs von Materialien sowie Energieträgern in den jeweiligen Prozessschritten wurden erhoben und überprüft. Der Erhebungszeitraum bezieht sich auf das Jahr 2019 und wurde auf der Grundlage realer Verbrauchsdaten ermittelt. Die Qualität der gesammelten Vordergrunddaten ist somit als sehr gut zu bewerten. Weiterhin wird für die Herstellung neuer Wasserzähler eine Stückliste erstellt, in welcher alle verbauten Teile mit ihrer Masse und der Materialart aufgeführt sind.

Die Daten des Hintergrundsystems basieren auf der aktuellen Version der GaBi Datenbanken (Servicepack 40, 2020)[93]. Die Datensätze repräsentieren den Stand der Technik der Energiebereitstellung, der Werkstoffherstellung und der industriellen Fertigungs- und Verarbeitungsprozesse für das Referenzjahr 2019.

[92] VDI 4800 Blatt 2 (2018).
[93] Sphera (2020a).

5.2.3.3 Datenbanken und Software

Ökobilanzmodelle werden mittels der GaBi 9 Software erstellt[94]. Die zugehörigen GaBi 2020 Datenbanken (Servicepack 40) liefern aktuelle Sachbilanzdaten für die Hintergrundsysteme[95]. Detaillierte Informationen zu den Modellierungsprinzipien und Qualitätsanforderungen sind in den sogenannten GaBi Modeling Principles[96] verfügbar.

5.2.3.4 Datenaufnahme und Kostenpositionen für die ökonomische Bewertung

Die ökonomische Analyse basiert auf demselben Betrachtungsrahmen wie die Ökobilanz. Die erhobenen Daten zu Massen- und Energieflüssen werden um Kostendaten erweitert. Da sowohl die ökonomische als auch die ökologische Analyse auf Grundlage der gleichen Systemgrenzen erfolgen, ist die Konsistenz beider Analysen sichergestellt.

Die Firma Lorenz erstattet den Kunden eine Rückvergütung, deren Höhe vom Zustand des zurückgegebenen Wasserzählers abhängt. Die Aufarbeitungsschritte sind in Kapitel 5.2.2.3 dargestellt. Insbesondere bei der umfangreichen Aufarbeitung werden Prozessschritte betrachtet, wie beispielsweise die in Abbildung 16 beschriebenen Prozessschritte C-VI (Vergabe einer neuen OMS-Gerätenummer & Konformitätsprüfung) und C-VII (Softwareupdate & Platinenprüfung). Obwohl diese Kosten verursachen, sind sie aus ökologischer Sicht nicht relevant. Diese Kostenpositionen werden in der ökonomischen Analyse erfasst, während sie bei der ökologischen Analyse vernachlässigt werden.

Der Betrachtungsrahmen für die ökonomische und ökologische Analyse ist somit der gleiche. Die Betrachtungen erfolgen jedoch auf einem unterschiedlichen Aggregationsniveau, um u. a. sensible Details zu schützen. Die Konsistenz von ökonomischer und ökologischer Analyse ist somit bei gleichzeitiger Wahrung der Vertraulichkeit sichergestellt.

[94] Sphera (2020b).
[95] Sphera (2020a).
[96] Sphera (2020c).

5.2.4 Sensitivitätsanalysen

Grundlage der ökologischen Bewertung ist das Basisszenario, in dem die Herstellung der Wasserzähler der durchschnittlichen Aufarbeitung gegenübergestellt wird. Für die Aufarbeitung werden die durchschnittlichen Aufarbeitungsaufwände der Firma Lorenz zugrunde gelegt. Dazu werden die jeweiligen Anteile von einfacher und umfangreicher Aufarbeitung im Ökobilanzmodell zusammengeführt.

Ausgehend vom Basisszenario werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Stabilität des Modells und der Ergebnisse zu bewerten. Dabei wird zunächst die einfache Aufarbeitung mit der umfangreichen Aufarbeitungsoption verglichen. Es werden verschiedene Energieszenarien (Einsatz von Elektrizität aus erneuerbaren Quellen, Nutzung von Biogas sowie von lastfreier thermischer Energie (TE)) sowie der Einfluss von höheren Transportentfernungen für die Auslieferung und Rückführung der Wasserzähler betrachtet. Als bester anzunehmender Fall („Best Case“) wird ein Szenario der CO_2-reduzierten einfachen Aufarbeitung berechnet, bei der Elektrizität aus erneuerbaren Quellen sowie lastfreie thermische Energie für die Desinfektion genutzt werden. Durch die Kombination von einfacher Aufarbeitung und dem Einsatz von erneuerbaren Energieträgern stellt dies die minimalen ökologischen Wirkungen der Aufarbeitung nach aktuellem Stand dar. Dem wird der schlechteste anzunehmende Fall („Worst Case“) gegenübergestellt, die umfangreiche Aufarbeitung der Wasserzähler mit Transportentfernungen für Auslieferung und Rückführung von 500 km. Diese beiden Fälle stellen somit die Bandbreite der ökologischen Wirkungen der Aufarbeitung von Wasserzählern bei der Firma Lorenz dar. Tabelle 17 gibt einen Überblick über die jeweiligen Modelleinstellungen für die durchgeführten Sensitivitätsanalysen.

Tabelle 17: Bezeichnung und Rahmenbedingungen der Sensitivitätsanalysen

Nr.	Bezeichnung	Rahmenbedingungen
1	einfache Aufarbeitung	nur einfache Aufarbeitung betrachtet
2	umfangreiche Aufarbeitung	nur umfangreiche Aufarbeitung betrachtet
3	Best Case	einfache Aufarbeitung, erneuerbare Energieträger, thermische Energie lastfrei
4	Worst Case	umfangreiche Aufarbeitung, lange Transportentfernung (500 km, statt 145 km)
5	TE Biogas	Einsatz von Biogas (statt Erdgas)
6	TE lastfrei	lastfreie Nutzung thermischer Energie (überschüssige thermische Energie aus anderer WSK)
7	lange Transporte	Transporte Auslieferung / Rückführung 500 km (statt 145 km)

5.3 Ergebnisse der vergleichenden Lebenszyklusanalysen

5.3.1 Ergebnisse der ökologischen Bewertung des Basisszenarios

Die ökologische Analyse erfolgt auf Grundlage des Basisszenarios und stellt die Herstellung neuer Wasserzähler den durchschnittlichen Aufwendungen zur Aufarbeitung von Wasserzählern der Firma Lorenz gegenüber. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 aufgeführt. Daraus wird deutlich, dass die Aufarbeitung im Vergleich zur Herstellung von Neuware zu einer Reduktion von mehr als 90 % der Umweltwirkungen in allen betrachteten Wirkungskategorien führt.

Tabelle 18: Ökologische Wirkungen Basisszenario

Wirkungskategorie	Referenzeinheit	Neuware	Aufgearbeitet
Wasserverbrauch	m^3	20,14	0,65
Siedlungsflächen	m^2*a	0,01	0,00
Landwirtschaftsflächen	m^2*a	0,12	0,01
Metalle, Mineralien	kg	40,66	0,68
Energierohstoffe	kg	1,50	0,08
KEA, erschöpflich	MJ	49,14	2,38
KEA, regenerativ	MJ	9,51	0,69
Treibhauspotenzial	kg CO_2-Äquivalent	3,86	0,18

Die Treibhausgasemissionen der einzelnen Lebenszyklusphasen in kg CO_2-Äquivalent sind in Abbildung 17 grafisch dargestellt. Insbesondere die Herstellung der Neuware verursacht hohe Treibhausgasemissionen.

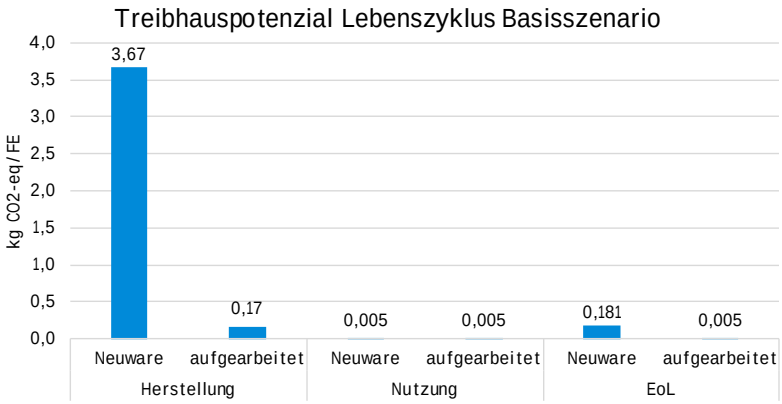

Abbildung 17: Treibhausgasemissionen der Lebenszyklusphasen, Basisszenario

In Abbildung 18 werden die Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung der Neuware verursacht werden, detailliert analysiert. Einige der angeführten Prozesse bzw. die Herstellung von Teilen erfolgt dabei in der Vorkette, andere bei Lorenz intern. Dementsprechend wird dies in der Abbildung gruppiert: Elektronik, Batterie und Lagersteine werden zugekauft, die Umweltwirkungen fallen also in der Vorkette an. Bei der Messingfertigung wird Messing eingekauft, die Verarbeitung erfolgt aber intern. Auch im Block Zusammenbau sind extern gefertigte Bauteile sowie der eigentliche Zusammenbau der Teile bei Lorenz beinhaltet, es sind somit Vorkette und interne Prozesse zusammengefasst. Desinfektion und Test der Wasserzähler erfolgen intern bei Lorenz.

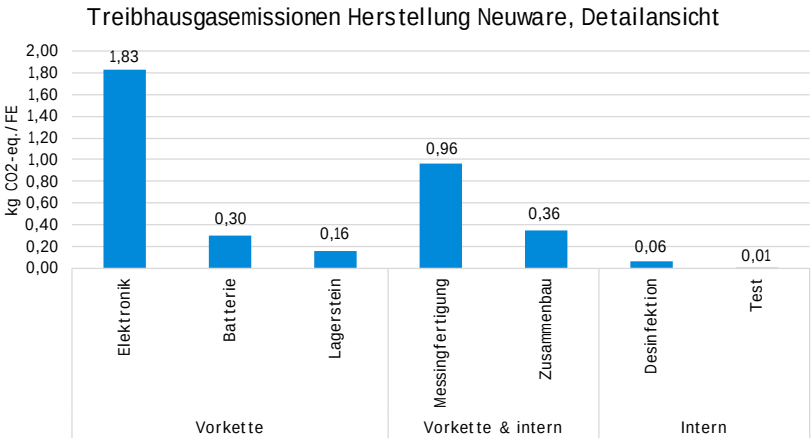

Abbildung 18: Detailansicht Treibhausgasemissionen, Herstellung Neuware

Abbildung 18 zeigt, dass die Elektronik allein rund die Hälfte der Treibhausgasemissionen der Herstellung verursacht, obwohl sie lediglich 9 g wiegt. Die Vorfertigung und Bearbeitung der Messingteile für das Gehäuse erzeugen dagegen rund 1 kg Treibhausgasemissionen bei einem Gewicht von 268 g. Trotz ihrer äußerst geringen Masse von 0,04 g bedingen die Lagersteine aus Saphir 0,16 kg CO_2-Äquivalente. Dies ist auf die aufwändige Förderung von Saphiren zurückzuführen, obwohl der Golddatensatz über das Preisverhältnis angepasst ist. Herstellung und Anlieferung der Batterie sowie der Zusammenbau inklusive der Fertigung der weiteren verbauten Teile verursachen jeweils rund 0,3 kg CO_2-Äquivalente. Die Desinfektion und das Testen rufen im Verhältnis sehr geringe Treibhausgasemissionen hervor.

Im Rahmen der Aufarbeitung werden lediglich die Abdeckhaube des Wasserzählers (deren Herstellung 0,11 kg CO_2-Äquivalente verursacht) sowie die Batterie getauscht, die restlichen Komponenten können weiter genutzt werden. Dadurch ergibt sich das dargestellte hohe ökologische Reduktionspotenzial.

Zur Sicherstellung der Zukunftsfähigkeit der aufgearbeiteten Wasserzähler verbaut die Firma Lorenz Elektroniken mit mehr Speicherplatz als aktuell nötig. Dadurch wird sichergestellt, dass die Elektronik auch künftige steigende Anforderungen erfüllen kann. Durch diese proaktive Herangehens-

weise können ein eventuell nötiger Austausch der Elektronik bei gestiegenen Anforderungen vermieden und die Umweltwirkungen der Aufarbeitung dadurch zukünftig niedrig gehalten werden, obwohl es bei der Erstbeschaffung etwas Mehraufwand verursacht. Der Mehraufwand bezieht sich auch auf die ökologische Wirkung durch die Elektronik. Ein größerer Speicher (Chip, Bauteil auf Board) hat eine höhere umweltrelevante Wirkung. Im Vergleich zu einem Austausch der Elektronik ist dieser Mehraufwand jedoch sehr viel kleiner.

5.3.2 Ergebnisse der Rohstoffkritikalität

Zur Bewertung der verbauten Rohstoffe wird eine Analyse entsprechend VDI 4800 Blatt 2[97] durchgeführt. Dabei werden geologische, ökonomische, soziale, politische und technische Aspekte berücksichtigt. Im Rahmen dieser Studie werden lediglich exogene Aspekte (angebots- und nachfrageseitige Aspekte, die nicht vom betrachteten Unternehmen beeinflusst werden können) untersucht. Die endogenen Kriterien beinhalten Aspekte, die vom Unternehmen direkt beeinflusst werden können. Diese werden hier nicht betrachtet. Die Bewertung der Rohstoffe erfolgt über normierte Indikatoren, welche zwischen 0 und 1 liegen. Ein Indikatorwert von 0 entspricht dabei einer geringen Kritikalität, ein Indikatorwert von 1 einer hohen Kritikalität für einen Rohstoff und ein bestimmtes Kriterium. Die exogenen Kriterien unterteilen sich in drei Kriteriengruppen:

- **geologische, technische und strukturelle Kriterien:** statische Reichweite, Neben-/Koppelproduktion, Recycling, logistische Beschränkungen, Beschränkungen durch Naturereignisse,
- **geopolitische und regulatorische Kriterien:** Länderkonzentration der Reserven, Länderkonzentration der Produktion, geopolitische Risiken der Weltproduktion, regulatorische Situation für Rohstoffprojekte,
- **ökonomische Kriterien:** Unternehmenskonzentration der globalen Produktion, globaler Nachfrageimpuls, Substituierbarkeit, Rohstoffpreisschwankungen.

[97] VDI 4800 Blatt 2:2018-03.

Zur Bewertung der Rohstoffkritikalität bei der Herstellung und Aufarbeitung von Wasserzählern werden zunächst die relevanten Rohstoffe ermittelt, die im Produktsystem verwendet werden.

Aufgrund der Modularität bei der Aufarbeitung wird das Produktsystem aufgegliedert, um eine detailliertere Analyse zu ermöglichen. Die betrachteten Module sind:

- Elektronik (ohne Batterie),
- Batterie,
- Herstellung des Gehäuses und der Mechanik der Neuware (ohne Batterie und Elektronik),
- umfangreiche Aufarbeitung.

Tabelle 19 zeigt die in der Elektronik des Wasserzählers verbauten kritischen Rohstoffe. In der Elektronik werden insgesamt zwölf kritische Rohstoffe verwendet. Die durchschnittliche Kritikalität aller Rohstoffe, die sich aus dem Mittelwert sämtlicher einzelnen Durchschnittswerte über alle Kriterien ergibt, liegt mit einem Wert von 0,5 im mittleren Bereich. Es wird deutlich, dass insbesondere die Länderkonzentration der Produktion ein großes Risiko über nahezu alle als kritisch betrachteten Rohstoffe hinweg darstellt (Aluminium, Chrom, Cobalt, Eisen, Palladium, Platin, Silicium, Zink und Zinn). Auch die Preisvolatilität trägt zum Rohstoffrisiko bei.

Tabelle 19: Rohstoffkritikalität – Elektronik Wasserzähler

	Rohstoff/Element	Aluminium	Chrom	Cobalt	Eisen	Kupfer	Nickel	Palladium	Platin	Silber	Silicium	Zink	Zinn
	Durchschnittliche Kritikalität des Rohstoffs	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,4**	**0,4**	**0,4**	**0,6**	**0,5**	**0,5**	**0,4**	**0,5**	**0,5**
Geologische, technische und strukturelle Kriterien	Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	0,0	1,0	0,3	0,3	0,7	0,7	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0
	Grad der Koppel-/Nebenproduktion	0,0	0,0	0,7	0,0	0,3	0,3	0,7	0,3	0,7	0,0	0,3	0,0
	Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-Technologien	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7	0,3	0,7	0,7	0,7
	Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/Anbaugebiete	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geopolitische und regulatorische Kriterien	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	0,7	1,0	0,7	0,3	0,3	0,7	1,0	1,0	0,3	0,3	0,3	0,7
	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	1,0	1,0	1,0	1,0	0,7	0,3	1,0	1,0	0,3	1,0	1,0	1,0
	Politisches Länderrisiko	0,7	0,7	0,7	0,7	0,3	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	Regulatorisches Länderrisiko	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	0,7
Ökonomische Kriterien	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen	0,3	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3
	Grad der Nachfragesteigerung	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,3	0,3	0,7	0,3	0,0	0,0	0,3
	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	0,7	1,0	1,0	0,7	0,7	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	0,7
	Annualisierte Preisvolatilität	0,7	0,7	1,0	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	1,0	0,7	1,0	1,0

Durch die Verwendung einer leistungsfähigen Elektronik mit größerem Speicherplatz als derzeit nötig reduziert die Firma Lorenz proaktiv den Bedarf zum Austausch der Elektronik und vermeidet damit in zukünftigen Produktlebenszyklen komplett die Kritikalität der Elektronik, ausgenommen im Schadensfall, dessen Eintrittswahrscheinlichkeit jedoch durch die vorgenommenen Änderungen nicht beeinflusst wird. Neben den bereits zuvor aufgezeigten ökologischen Potenzialen führt dies auch zu einer Reduktion der Rohstoffkritikalität bei der Aufarbeitung, da die Elektronik nicht getauscht werden muss.

Die Rohstoffkritikalität der Batterie ist in Tabelle 20 dargestellt. Hier werden lediglich fünf kritische Rohstoffe verbaut. Die durchschnittliche Kritikalität sämtlicher Rohstoffe, die sich aus dem Mittelwert aller einzelnen Durchschnittswerte über alle Kriterien ergibt, liegt mit einem Wert von 0,5 ebenfalls im mittleren Bereich. Trotz der geringeren Anzahl an kritischen Rohstoffen ist die Kritikalität bei der Batterie vergleichbar mit der der Elektronik. Auch bei der Batterie wird insbesondere die Länderkonzentration bei der Rohstoffproduktion als riskant eingestuft (Cobalt, Indium, Lithium). Die technische und wirtschaftliche Machbarkeit einer Substitution von Rohstoffen sowie die Preisvolatilität sind jedoch die relevantesten ökonomischen Risiken für vier der fünf Rohstoffe (Cobalt, Indium, Mangan, Nickel). Dies ist hauptsächlich der Grund für den gleichen gesamtdurchschnittlichen Kritikalitätswert wie bei der Elektronik.

Tabelle 20: Rohstoffkritikalität – Batterie Wasserzähler

	Rohstoff/Element	Cobalt	Indium	Lithium	Mangan	Nickel
	Durchschnittliche Kritikalität des Rohstoffs	**0,6**	**0,7**	**0,5**	**0,4**	**0,4**
Geologische, technische und strukturelle Kriterien	Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	0,3	1,0	0,0	0,7	0,7
	Grad der Koppel-/ Nebenproduktion	0,7	1,0	0,0	0,0	0,3
	Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-Technologien	0,7	0,7	1,0	0,3	0,3
	Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/Anbaugebiete	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geopolitische und regulatorische Kriterien	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	0,7	0,3	1,0	0,7	0,7
	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	1,0	1,0	1,0	0,7	0,3
	Politisches Länderrisiko	0,7	0,7	0,3	0,3	0,3
	Regulatorisches Länderrisiko	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3
Ökonomische Kriterien	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen	0,3	0,7	0,7	0,3	0,3
	Grad der Nachfragesteigerung	0,3	1,0	0,3	0,0	0,3
	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	1,0	1,0	0,7	1,0	1,0
	Annualisierte Preisvolatilität	1,0	1,0	0,7	1,0	1,0

Tabelle 21 zeigt die Rohstoffkritikalität bei der Herstellung des Gehäuses und der Mechanik von Neuware. In Kombination mit der Batterie und Elektronik wird hieraus ein Wasserzähler gefertigt. Auch hier werden insgesamt fünf kritische Rohstoffe verbaut. Die durchschnittliche Kritikalität aller Rohstoffe, die sich aus dem Mittelwert aller einzelnen Durchschnittswerte über sämtliche Kriterien ergibt, liegt mit einem Wert von 0,4 niedriger als bei der Elektronik und Batterie. Auch hier ist insbesondere die Preisvolatilität der

Rohstoffe ein kritischer Aspekt. Alle anderen Aspekte liegen aber entsprechend niedriger als bei der Elektronik und Batterie. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass Messing zu einem signifikanten Anteil auf Messingschrott basiert, da es sich um geschlossene Materialkreisläufe handelt und nur geringe Mengen (im angewendeten Modell bis zu 10 %) Neumaterial zulegiert werden.

Tabelle 21: Rohstoffkritikalität – Herstellung Gehäuse und Mechanik der Neuware

	Rohstoff/Element	Chrom	Erdöl	Kupfer	Nickel	Zink
	Durchschnittliche Kritikalität des Rohstoffs	**0,5**	**0,3**	**0,4**	**0,4**	**0,5**
Geologische, technische und strukturelle Kriterien	Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	1,0	0,3	0,7	0,7	1,0
	Grad der Koppel-/Nebenproduktion	0,0	0,0	0,3	0,3	0,3
	Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-Technologien	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7
	Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0
	Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/Anbaugebiete	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geopolitische und regulatorische Kriterien	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	1,0	0,3	0,3	0,7	0,3
	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	1,0	0,3	0,7	0,3	1,0
	Politisches Länderrisiko	0,7	0,7	0,3	0,3	0,7
	Regulatorisches Länderrisiko	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Ökonomische Kriterien	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3
	Grad der Nachfragesteigerung	0,3	0,7	0,3	0,3	0,0
	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	1,0	0,0	0,7	1,0	1,0
	Annualisierte Preisvolatilität	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0

Bei der Betrachtung der Herstellung von Neuware mit Bezug auf alle drei Module (Elektronik, Batterie, Gehäuse) zeigt sich, dass insbesondere bei der Elektronik und Batterie eine große Anzahl kritischer Rohstoffe verbaut wird. Bei der Transformation von Neuware hin zu Remanufacturing wird dies bei der Elektronik, z. B. durch den größeren Speicher, zukunftsfähig gestaltet. Dabei wird die Rohstoffkritikalität für die Aufarbeitung bereits in der Produktgestaltung systematisch reduziert.

Die Rohstoffkritikalität bei der Aufarbeitung basiert auf den beiden auch ökologisch dargestellten Aufarbeitungsszenarien, der einfachen und der aufwändigen Aufarbeitung (vgl. Abbildung 15 und Abbildung 16).

Bei der aufwändigen Aufarbeitung wird die Haube des Wasserzählers abgestochen und die Batterie getauscht. Die Kritikalität bei der Herstellung der Batterie wurde bereits in Tabelle 20 aufgeführt. Die Kritikalität beim Austausch der Haube ist in Tabelle 22 dargestellt. Die Haube ist aus Polycarbonat, somit ist der einzig verbaute kritische Rohstoff Erdöl. Die durchschnittliche Rohstoffkritikalität liegt bei 0,3; die Preisvolatilität stellt dabei den kritischsten Aspekt dar.

Tabelle 22: Rohstoffkritikalität – aufwändige Aufarbeitung

	Rohstoff/Element	Erdöl
	Durchschnittliche Kritikalität des Rohstoffs	**0,3**
Geologische, technische und strukturelle Kriterien	Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion	0,3
	Grad der Koppel-/Nebenproduktion	0,0
	Verbreitungsgrad funktionaler End-of-Life-Technologien	0,3
	Wirtschaftlichkeit von Lagerung und Transport	0,3
	Verbreitungsgrad natürlicher Vorkommen/Anbaugebiete	0,0
Geopolitische und regulatorische Kriterien	Herfindahl-Hirschman-Index der Reserven	0,3
	Herfindahl-Hirschman-Index der Länderproduktion	0,3
	Politisches Länderrisiko	0,7
	Regulatorisches Länderrisiko	0,3
Ökonomische Kriterien	Herfindahl-Hirschman-Index der Unternehmen	0,3
	Grad der Nachfragesteigerung	0,7
	Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Substitutionen in Hauptanwendungen	0,0
	Annualisierte Preisvolatilität	1,0

Bei der einfachen Aufarbeitung werden keinerlei Materialien getauscht, sondern die Wasserzähler lediglich gereinigt und neu geeicht. Dadurch besteht in diesem Fall keine Rohstoffkritikalität. Der Wert entspricht somit einer Kritikalität von 0.

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Rohstoffkritikalität bei der Aufarbeitung erheblich niedriger ausfällt als bei der Herstellung von Neuware. Dies ist auf den verhältnismäßig geringen Anteil an auszutauschenden Materialien zurückzuführen. Jedoch trägt insbesondere die zukunftsfähige Gestaltung der Elektronik zu einer proaktiven Reduzierung der Rohstoffkritikalität bei.

Die als Lagersteine verwendeten Saphire sowie das in der Elektronik enthaltene Gold sind nicht in VDI 4800 Blatt 2[98] enthalten. Auf Grund des Preises sowie der hohen Umweltrelevanz beider Materialien wäre eine Aufnahme in die Liste der kritischen Ressourcen vorteilhaft. Es lässt sich jedoch vermuten, dass deren Kritikalitätswerte die vorliegenden Ergebnisse in ihrer Grundaussage nicht verändern.

5.3.3 Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

Im Rahmen der ökonomischen Analyse werden die Herstellkosten von neu hergestellten Wasserzählern mit denen der aufgearbeiteten Wasserzähler verglichen. Daten zu Kostenpositionen werden bei der Firma Lorenz erhoben. In den Herstellkosten enthalten sind die Material- und Fertigungskosten. Aus Gründen der Vertraulichkeit sind die Herstellkosten nur als relative Werte dargestellt und teilweise (insbesondere bei der Neuware) aggregiert.

Die Kosten für die Aufarbeitung der Wasserzähler sind Durchschnittswerte, in denen der jeweilige Aufwand für die Aufarbeitung mengenmäßig gewichtet wird.

Aus den genauen Daten der Herstellkosten ist ersichtlich, dass die Aufarbeitung von Wasserzählern im Vergleich zur Neuherstellung deutlich günstiger ist. Die Daten sind aus Gründen der Geheimhaltung hier nicht veröffentlicht. Die durchschnittlichen Herstellkosten der Aufarbeitung belaufen sich auf die Hälfte der Kosten für Neuware.

Es werden verschiedene Prozessrouten der Aufarbeitung (Aufarbeitung 1 bis Aufarbeitung 4) und ihre jeweiligen Kosten dargestellt. Zähler in gutem Zustand durchlaufen dabei weniger Aufarbeitungsschritte und verursachen

[98] **VDI 4800 Blatt 2:2018-03.**

dementsprechend geringere Aufarbeitungskosten. Jedoch ist die an den Kunden gezahlte Rückgabegebühr dementsprechend höher, was in der Folge zu vergleichbaren Kosten für die Aufarbeitung führt, unabhängig vom Zustand der rückgeführten Wasserzähler. Tabelle 23 stellt die jeweils nötigen Schritte der Aufarbeitung in Abhängigkeit vom Zustand der Wasserzähler dar. Dabei ist die einfache Aufarbeitung (Aufarbeitungsvariante 1 und 1a) grün unterlegt, die Varianten 2 bis 4 stellen die aufwändige Aufarbeitung dar. Die Spalte „Anteil“ bezeichnet dabei die Häufigkeit der erforderlichen Aufarbeitungsschritte.

Tabelle 23: Überblick über Aufarbeitungsvarianten

	Stufe der Aufarbeitung				
	1	1a	2	3	4
Rückkauf alter Zähler	X	X	X	X	X
Eichung	X	X	X	X	X
Aufkleber		X	X	X	X
Haube			X	X	X
DataMatrix + Software-Update				X	X
Batterie					X
Anteil	**50 %**	**25 %**	**10 %**	**10 %**	**5 %**

Für Wasserzähler in gutem Zustand (Aufarbeitung 1 und 1a) werden höhere Vergütungen für die Rückgabe gezahlt. Dafür ist die Aufarbeitung weniger aufwändig und im besten Fall sind nur eine Reinigung, Desinfektion und neue Eichung erforderlich. Je schlechter der Zustand der Wasserzähler, desto geringer werden die Kosten für den Rückkauf. Gleichzeitig ist aber eine aufwändigere Aufarbeitung erforderlich.

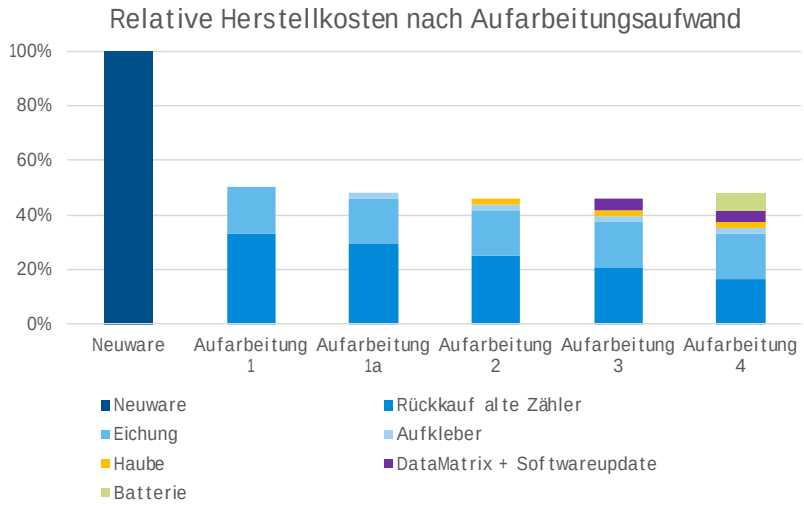

Abbildung 19: Relative Herstellkosten nach Arbeitsaufwand

Die größten Kostenblöcke der Aufarbeitung entstehen durch den Rückkauf der gebrauchten Wasserzähler sowie die Eichung der aufgearbeiteten Wasserzähler. Die Erstattung beim Rückkauf hängt vom Zustand der Geräte ab. Für die Eichung fällt eine Eichgebühr an, die einen großen Anteil an den Gesamtkosten der Aufarbeitung ausmacht.

5.3.4 Sensitivitätsanalysen

Die Sensitivitätsanalysen dienen zur Stabilitätsprüfung der Modelle und zugrunde liegenden Annahmen. Sie zeigen auch Verbesserungspotenziale auf, die beispielsweise durch die Nutzung anderer Energieträger entstehen können.

Die definierten Sensitivitätsanalysen beeinflussen hauptsächlich die ökologischen Aspekte sowie die Ressourcenkritikalität. Die ökonomischen Aspekte werden durch die Parametervariationen in äußerst geringem Umfang beeinflusst. Die Quantifizierung der Auswirkungen ist hier in den meisten Fällen durch das höhere Aggregationslevel nicht möglich. Die betrachteten Fälle sind in Tabelle 17 dargestellt. Ein großer Teil beeinflusst lediglich die Aufarbeitung, nicht aber die Herstellung der Neuware. Tabelle 24 stellt die relative Veränderung der Umweltwirkungen der aufgearbeiteten Wasser-

zähler im Verhältnis zum Basisszenario dar. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Szenarien nur mit den ihnen zugewiesenen Nummern bezeichnet. Es zeigen sich zum Teil deutliche Veränderungen zum Basisszenario. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Basiswerte relativ niedrig sind. Auch kleine absolute Änderungen können somit zu großen relativen Abweichungen führen.

Tabelle 24: Relative Veränderung der ökologischen Ergebnisse der Aufarbeitung

Wirkungskategorie	Variante						
	1	2	3	4	5	6	7
Wasserverbrauch	-42%	126%	-33%	128%	25%	0%	2%
Siedlungsflächen	-92%	275%	-85%	275%	0%	0%	0%
Landwirtschaftsflächen	-11%	34%	205%	43%	241%	0%	9%
Metalle, Mineralien	-23%	69%	-96%	69%	-1%	-3%	0%
Energierohstoffe	-31%	94%	-92%	103%	-8%	-9%	9%
KEA, erschöpflich	-36%	109%	-89%	122%	-12%	-13%	13%
KEA, regenerativ	-14%	42%	152%	44%	113%	0%	3%
Treibhauspotenzial	-36%	109%	-84%	122%	-6%	-11%	13%

In Variante 1 und 2 wird der Unterschied zwischen einfacher und aufwändiger Aufarbeitung deutlich. Die einfache Aufarbeitung findet ohne den Austausch von Teilen statt, die Umweltwirkungen sind somit am geringsten. Bei der aufwändigen Aufarbeitung werden hingegen Teile (Abdeckhaube und Batterie) getauscht, die Umweltwirkungen fallen dementsprechend höher aus. Trotz des deutlichen Anstiegs in Variante 2 sind die Umweltwirkungen der aufwändigen Aufarbeitung immer noch geringer als die der Herstellung von Neuware.

Variante 3 stellt das ökologische Potenzial für die derzeit beste vorstellbare Aufarbeitung dar. Dabei werden nur Wasserzähler in gutem Zustand aufgearbeitet (einfache Aufarbeitung). Der elektrische Strom wird aus erneuerbaren Quellen bezogen, die benötigte thermische Energie wird als lastfrei (ohne Umweltwirkungen) berechnet. Dies ist beispielsweise bei der Nutzung von Abwärme umliegender Betriebe möglich, wenn diese ansonsten ungenutzt bliebe. Bei den Ergebnissen zeigt sich hier ein gemischtes Bild: Während das Treibhauspotenzial, der erschöpfliche KEA, der Ressourcenverbrauch (Metalle, Mineralien & Energierohstoffe), der Wasserverbrauch sowie der Verbrauch an Siedlungsflächen deutlich sinken, steigen der KEA regenerativ

und der Bedarf an Landwirtschaftsflächen an. Der Anstieg des Flächenbedarfs ist auf den höheren Anteil an Biomasse in der Elektrizitätserzeugung zurückzuführen. Durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger erhöht sich der regenerative KEA, während der erschöpfliche KEA dementsprechend sinkt. In dieser Variante sind die Treibhausgasemissionen minimal: Je aufgearbeitetem Zähler werden lediglich 29 g CO_2-Äquivalente erzeugt, wovon 9 g aus Logistikprozessen stammen. Sollte unter diesen Annahmen eine CO_2-neutrale Aufarbeitung von Lorenz angestrebt werden, müssten die verbleibenden 20 g Treibhausgasemissionen durch Ausgleichsprojekte kompensiert werden. Bei einem angenommenen Preis der Kompensation von 23 Euro je Tonne Treibhausgasemissionen[99] würde dies zu Kosten von rund 0,05 Cent je Wasserzähler führen. Soll hingegen die durchschnittliche Aufarbeitung, wie sie derzeit bei Lorenz durchgeführt wird, kompensiert werden, würde dies durchschnittliche Kosten von 0,4 Cent je Wasserzähler ausmachen.

Variante 4 kombiniert die aufwändige Aufarbeitung mit langen Transportstrecken von 500 km (anstatt 145 km) für die Auslieferung und Rückführung der Wasserzähler. Dies ist eine Worst-Case-Betrachtung für die Aufarbeitung, jedoch ist auch diese immer noch deutlich ökologischer als die Herstellung von Neuware (mit rund 90 % geringeren Umweltwirkungen in allen betrachteten Wirkungskategorien).

Die Varianten 5 und 6 quantifizieren den Einfluss der unterschiedlichen Bereitstellungen von thermischer Energie. Die Nutzung von Biogas führt zu einem höheren Wasser- und Flächenverbrauch. In der Folge steigt der Anteil des regenerativen KEA, während der erschöpfliche KEA, der Ressourcenbedarf sowie das Treibhauspotenzial sinken. In Variante 6 werden die Umweltwirkungen der Erzeugung von thermischer Energie in ein anderes Produktsystem allokiert. Dies ist zulässig, wenn die dort erzeugte thermische Energie andernfalls ungenutzt bliebe. Dadurch sinken die berechneten Beiträge zu Ressourcenbedarf, KEA erschöpflich und Treibhausgasemissionen.

In Variante 7 werden die Transportentfernungen für die Auslieferung und Rückführung der Wasserzähler von 145 km auf 500 km Wegstrecke erhöht.

[99] **Atmosfair (2020).**

Es zeigt sich, dass die Erhöhung der Entfernung zu einem geringen Anstieg der Umweltwirkungen führt.

Im Rahmen der Rohstoffkritikalitätsanalysen ergeben sich lediglich bei der Unterscheidung zwischen einfacher und aufwändiger Aufarbeitung Unterschiede. Bei der einfachen Aufarbeitung werden keine Teile getauscht, somit tritt auch keine Rohstoffkritikalität auf. Bei der aufwändigen Aufarbeitung werden Haube und Batterie getauscht und dementsprechend kritische Rohstoffe benötigt. Insgesamt zeigt sich aber, dass die Aufarbeitung eine deutlich geringere Rohstoffkritikalität als die Herstellung der Neuware aufweist. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Elektronik, das Gehäuse und die Mechanik weiter genutzt werden können. Durch den Einsatz der Elektronik mit größerem Speicher wurde außerdem die Zukunftssicherheit der Elektronik gesichert und dadurch die Rohstoffkritikalität proaktiv verringert.

Im Rahmen der ökonomischen Betrachtung wird lediglich zwischen fünf Aufarbeitungsvariationen unterschieden. Die nötigen Aufarbeitungsschritte und die daraus resultierenden Kosten hängen vom Zustand der Zähler ab. Eine umfangreichere Aufarbeitung verursacht entsprechend höhere Kosten. Durch die flexible Rückerstattung in Abhängigkeit vom Zustand der Wasserzähler werden diese unterschiedlichen Kosten jedoch ausgeglichen. Es zeigt sich, dass die relativen Herstellkosten für die Aufarbeitung in allen betrachteten Aufarbeitungsfälle nahezu identisch sind und sich auf rund die Hälfte der Herstellkosten von Neuware belaufen.

5.4 Bewertung der vergleichenden Lebenszyklusanalysen

Die in dieser Studie durchgeführte vergleichende Lebenszyklusanalyse stellt die Aufarbeitung von Wasserzählern der Firma Lorenz GmbH der Herstellung von Neuware gegenüber. Durch die Untersuchung der Umweltwirkungen, Rohstoffkritikalität und ökonomischen Aspekte wird hierbei ein umfassender Vergleich ermöglicht.

Im Rahmen der Ökobilanz werden eine Vielzahl von Wirkungsindikatoren bewertet (Treibhauspotenzial, Wasser- und Flächenverbrauch sowie der kumulierte Rohstoff- und Energieaufwand). Durch die umfassende Bewertung

kann eine Verschiebung von Umweltwirkungen zwischen den einzelnen Wirkungskategorien erkannt und gegebenenfalls vermieden werden. Für die hier untersuchte Aufarbeitung zeigt sich jedoch ein äußerst positives Ergebnis: Die Umweltwirkungen im Basisszenario sind in allen betrachteten Wirkungskategorien um mehr als 90 % niedriger als bei der Herstellung von Neuware. Dies ist insbesondere auf die Weiternutzung der aus ökologischer Sicht aufwändigsten Bauteile zurückzuführen, aber ebenfalls auf den geringen Bedarf des Austausches von Komponenten sowie die effiziente Aufarbeitung. Auch in betrachteten Sensitivitätsanalysen liegen die Umweltwirkungen der Aufarbeitung deutlich niedriger: Selbst in der Worst-Case-Betrachtung der Aufarbeitung sind die Treibhausgasemissionen noch um 89 % geringer als bei der Herstellung von Neuware.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Rohstoffkritikalität. Die meisten im Produkt verbauten kritischen Ressourcen werden in der Elektronik und Batterie genutzt, gefolgt von der Herstellung des Gehäuses und der Mechanik. Da im Rahmen der Aufarbeitung sowohl Elektronik als auch Gehäuse und Mechanik weiterverwendet werden, ist die Rohstoffkritikalität bei der Aufarbeitung deutlich geringer. Bei der aufwändigen Aufarbeitung werden die Haube und die Batterie getauscht; es werden also kritische Rohstoffe verbaut. Bei der einfachen Aufarbeitung hingegen werden keine Komponenten getauscht und somit auch keine zusätzlichen kritischen Rohstoffe benötigt.

Für die Rücknahme der Wasserzähler bietet die Firma Lorenz eine Erstattung an, deren Höhe vom Zustand und damit von den benötigten Aufarbeitungsschritten abhängig ist. Die Berechnung der Herstellkosten zeigt, dass die Höhe der Rückerstattung so gewählt ist, dass die gesamten Aufarbeitungskosten unabhängig vom Aufwand der Aufarbeitung fast identisch sind. Die Kosten für die Aufarbeitung belaufen sich auf rund 50 % der Herstellkosten von Neuware und dies ist somit für die Firma Lorenz auch aus ökonomischer Sicht vorteilhaft.

Ebenso entsteht für die Kunden ein Vorteil aus der Aufarbeitung: Durch die Erstattung bei der Rückgabe der Wasserzähler sinken die Kosten auch für den Kunden. Je nach Zustand kann die Ersparnis dabei im Vergleich zum Erwerb eines neuen Zählers rund ein Drittel des Neupreises ausmachen. Die Kunden bezahlen somit nicht mehr nur für den physischen Wasserzähler,

sondern bekommen auch eine Erstattung nach der planbaren Gebrauchsphase. Diese Reduktion der Kosten für ein Produkt geht in die Richtung eines Geschäftsmodells, bei dem nur für die Bereitstellung der benötigten Dienstleistung bezahlt wird (Product-to-Service oder Product-Service-System), nämlich die geeichte Erfassung der durchflossenen Wassermenge.

Die vergleichende Bewertung zeigt, dass die Aufarbeitung der Wasserzähler unter allen betrachteten Rahmenbedingungen vorteilhaft ist. Die Firma Lorenz kann von den niedrigeren Kosten bei der Aufarbeitung profitieren. Gleichzeitig ergibt sich eine gewisse Unabhängigkeit von Lieferanten, da die Wasserzähler von den Kunden zurückkommen. Die reduzierte Rohstoffkritikalität bei der Aufarbeitung reduziert Risiken im Einkauf. Aus gesellschaftlicher Sicht ist die Aufarbeitung aufgrund der deutlichen Reduzierung der Umweltwirkungen ebenfalls als äußerst positiv zu beurteilen. Für die Kunden erweist sich die Aufarbeitung ebenfalls als vorteilhaft, da ihnen die gleiche Leistung wie bei einem Neuprodukt (nämlich die geeichte Erfassung der durchflossenen Wassermenge) zu effektiv niedrigeren Kosten angeboten wird.

6 ERKENNTNISSE UND EMPFEHLUNGEN

6.1 Erkenntnisse

Wie im Rahmen dieser Studie dargestellt wird, bietet Remanufacturing großes Potenzial, wenn es systematisch aufgebaut und durchgeführt wird. Grundsätzlich müssen dazu Produkte und Geschäftsmodelle neu gedacht, entwickelt und umgesetzt werden, um die ökonomischen und ökologischen Vorteile nutzen zu können (vgl. Kapitel 3.1.1).

Wie in Kapitel 2 dargestellt, müssen dabei vier Hauptaspekte erfüllt werden:

- ein kreislauffähiges Produktdesign,
- geeignete Sammel- und Rücknahmesysteme,
- angepasste, innovative Geschäftsmodelle sowie
- weitere interne und externe Aspekte.

Das Produktdesign bestimmt auf technischer Ebene, ob, wie und in welchem Umfang Produkte aufgearbeitet werden können. Hierunter fallen Aspekte wie Modularität, Demontagefreundlichkeit, Langlebigkeit sowie eine klare Identifizierbarkeit von Produktvarianten und verbauten Materialien. Wenn diese Punkte erfüllt sind, ist ein Produkt gut für die Aufarbeitung geeignet. Falls dies nicht der Fall ist, sollte über eine Anpassung des Produktdesigns nachgedacht werden, um eine einfachere Aufarbeitung zu ermöglichen.

Aufzuarbeitende Produkte müssen jedoch für Unternehmen verfügbar sein. Hier ist ein geeignetes Sammel- und Rücknahmesystem unabdingbar. Beispielsweise müssen Informationen zum Verbleib der Produkte verfügbar sein, der Sammelaufwand sollte im Verhältnis zum Produktwert möglichst gering sein. Ein planbarer Lagerbestand, beispielsweise über vertraglich vereinbarte Nutzungszeiten, sowie eine gute Lagerfähigkeit tragen zur Sicherung der zur Aufarbeitung verfügbaren Produkte bei. Gibt es kein etabliertes Sammel- und Rücknahmesystem, empfiehlt sich der systematische Aufbau eines geeigneten Systems oder – wenn vorhanden – eine Kooperation mit einem kompatiblen, etablierten Sammel- und Rücknahmesystem.

Obwohl die Funktion der aufgearbeiteten Produkte in den meisten Fällen äquivalent zur Funktion der neu hergestellten Produkte ist, gibt es einige Unterschiede mit Blick auf das Geschäftsmodell. Zunächst ist die Kostenstruktur bei der Aufarbeitung eine andere, da Prozessschritte bei der Herstellung wegfallen können, gleichzeitig aber Kosten für die Rückführung und Aufarbeitung entstehen. Auch kann es sein, dass die Positionierung und Bepreisung des Produkts angepasst werden können, abhängig davon, wie die Kunden die Qualität und den Wert des jeweiligen aufgearbeiteten Produkts wahrnehmen. Auch die Konkurrenz am Markt spielt hierbei eine Rolle. Dieser Aspekt ist von Unternehmen nur zum Teil direkt beeinflussbar.

Weitere Aspekte sind beispielsweise gesetzliche Rahmenbedingungen für die Sammlung oder das Wiederinverkehrbringen von Produkten oder Haftungs- und Gewährleistungsrisiken durch aufgearbeitete Produkte. Auch das Angebot an qualifizierten Mitarbeitern für die Aufarbeitung fällt hierunter. Diese Punkte lassen sich von Unternehmen nicht direkt beeinflussen, sondern sind typischerweise durch vorhandene Rahmenbedingungen gegeben. Jedoch kann eine Anpassung der Rahmenbedingungen beispielsweise durch politische Akteure zu einer Verbesserung der Ausgangssituation führen.

Das Potenzial von Remanufacturing zeigt sich anhand wachsender Umsätze und Mitarbeiterzahlen (vgl. Kapitel 2.2). Ein weiterer Aspekt betrifft die gestiegene Kontrolle über die Wertschöpfungskette für Unternehmen: Wenn Produkte zurückgenommen und aufgearbeitet werden, sinkt die Abhängigkeit von (oftmals global vernetzten) Lieferketten, da ein großer Teil der Bauteile und Komponenten weiter genutzt werden kann. Dies kann insbesondere bei Schwierigkeiten im internationalen Handel, ausgelöst durch Preisschwankungen, Protektionismus und Zöllen, Umweltkatastrophen oder wie aktuell durch die COVID-19-Pandemie zu einer höheren Resilienz der Wertschöpfungskette führen.

Zur systematischen Bewertung für eine Eignung von Produktgruppen und Produkten für Remanufacturing wurde ein Bewertungssystem entwickelt (vgl. Kapitel 3.1), welches auf den vier Hauptaspekten des Remanufacturing aufbaut. Für jeden der Hauptaspekte wurden mehrere Kriterien abgeleitet, die sowohl qualitativ als auch quantitativ bewertet werden. Die quantitative

Bewertung erfolgt auf einer Skala von -2 bis +2. Ist ein Aspekt für das Remanufacturing sehr förderlich, wird er mit +2 bewertet, ist er stark hinderlich, erfolgt eine Bewertung mit -2. Aus der Bewertung der einzelnen Aspekte kann ein einzelner Gesamtwert berechnet werden, der die Eignung eines Produkts oder einer Produktgruppe für das Remanufacturing darstellt. Durch die strukturierte Erfassung und Bewertung von Aspekten können hemmende Faktoren identifiziert und systematisch adressiert werden.

Bei der Bewertung ausgewählter Beispiele zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Produktgruppen, aber teilweise auch innerhalb einer Produktgruppe. Eine Haupterkenntnis der Bewertung liegt darin, dass es für ein hohes Remanufacturing-Potenzial nicht ausreicht, in einzelnen Hauptaspekten, wie z. B. dem Produktdesign, eine gute Bewertung zu erzielen. Vielmehr werden neben einem geeigneten Produktdesign auch ein funktionierendes Sammel- und Rückführsystem und ein funktionierendes Geschäftsmodell benötigt sowie förderliche weitere Aspekte wie eine positive Wertwahrnehmung von Seiten der Kunden und Öffentlichkeit.

Aus der Bewertung der Produktbeispiele sowie der vorangegangenen Literaturrecherche werden Treiber und Hemmnisse für das Remanufacturing abgeleitet (vgl. Kapitel 4). Förderliche Aspekte stellen die vier bereits genannten Hauptaspekte dar. Ein geeignetes Produktdesign mit modularer Bauweise und hoher Wartungsfreundlichkeit, der Einsatz kreislauffähiger Materialien sowie der Verzicht auf toxische Stoffe steigern die Eignung von Produkten für das Remanufacturing. Ein funktionierendes Sammel- und Rückführsystem, das eine planbare Verfügbarkeit von aufzuarbeitenden Altprodukten sicherstellt, ist ebenso wie eine gute Lagerfähigkeit von Produkten und Komponenten stark förderlich.

Während das Produktdesign und die Einführung von Sammel- und Rückführsystemen relativ gut intern planbar sind, stellt die Entwicklung funktionierender Geschäftsmodelle oftmals eine Herausforderung dar: Das Geschäftsmodell hängt von Faktoren wie Produktdesign und Rückführung ab und lässt sich oftmals erst ableiten, wenn diese gegeben sind. Gleichzeitig kann aber z. B. eine Rückführlogistik ohne ein funktionierendes Geschäftsmodell nicht ohne weiteres finanziert werden. Die Entwicklung von Geschäftsmodellen

muss deshalb von Anfang an berücksichtigt werden und idealerweise in das Produktdesign und den Aufbau von Rückführsystemen einfließen.

Weitere Aspekte, auf die einzelne Unternehmen nur bedingt Einfluss nehmen können, sind: Wertwahrnehmung in der Öffentlichkeit, Angebot an qualifizierten Mitarbeitern oder höhere Löhne. Somit herrscht eine gewisse Abhängigkeit von förderlichen Rahmenbedingungen in diesem Bereich. Sind diese nicht gegeben, kann ein Unternehmen oftmals nur auf eine Verbesserung der Rahmenbedingungen, beispielsweise durch politische Akteure und Verbände, drängen.

Auch die für Remanufacturing hemmenden Faktoren betreffen die vier zuvor genannten Hauptaspekte. Eine hohe Integration und Miniaturisierung auf Komponentenebene sind für die Separierung und das Zerlegen nicht förderlich. Auch geht dies oft mit entsprechend kleinen Materialströmen einher, sodass eine Separierung zwar technisch möglich sein kann, in vielen Fällen aber nicht wirtschaftlich ist. Während Miniaturisierung und Dematerialisierung grundsätzlich zur Ressourceneffizienz beitragen, schaden sie der Kreislaufführung in vielen Fällen eher. Durch die hohe Integration wird die gesamte Lebensdauer eines Produkts oftmals durch die Lebensdauer der kurzlebigsten Komponente bestimmt, da Demontage und Reparatur nicht sinnvoll möglich sind. Eine hohe Materialvielfalt kann zu einer gemischten Sammlung führen, was die Sortierung dementsprechend aufwändiger gestaltet. Auch machen schwer kalkulierbare Rücknahmemengen die Planung von Lagerbeständen und Bearbeitungskapazitäten schwieriger. Damit steigen die logistischen Herausforderungen und erschweren die Identifikation der zurückgenommenen Teile. Durch den Mangel an etablierten Strukturen für Rückwärtslogistik, fehlende Lagerkapazitäten für zurückgenommene Produkte, einen Mangel an qualifiziertem Fachpersonal sowie oftmals niedrige Kosten für die Herstellung von Neuware kann der Verzicht auf Remanufacturing für viele Unternehmen als die einfachere und kosteneffizientere Lösung gesehen werden, als daraus ein tragfähiges Geschäftsmodell zu entwickeln. Ein weiterer Aspekt kann in der Wahrnehmung in der Gesellschaft und beim Kunden liegen. Viele Produkte werden als Statussymbol gesehen. Aufgearbeiteten Produkten kann der Reiz des Neuen und damit auch die Symbolträchtigkeit fehlen. Auch mangelt es an vielen Stellen in Betrieben

und in der Gesellschaft an dem Wissen zu den Vorteilen des Remanufacturing und dessen Potenzial, funktionsäquivalente Produkte oftmals zu niedrigeren Kosten bereitzustellen und Umweltwirkungen zu reduzieren. Die Wertschätzung gegenüber aufgearbeiteten Produkten als qualitativ hochwertige sowie ökologisch und ökonomisch vorteilhafte Optionen zu sehen, muss durch einen Wertewandel unterstützt werden.

Die in Kapitel 5 dargestellte Lebenszyklusanalyse am Beispiel der Firma Lorenz zeigt die Möglichkeiten der Gestaltung in positiver Weise. Produktdesign sowie das Sammel- und Rückführsystem wurden systematisch mit einem Geschäftsmodell kombiniert sowie aufeinander ausgerichtet und werden kontinuierlich verbessert und optimiert. Während die meisten Unternehmen am Markt die Aufarbeitung von Wasserzählern als nicht lohnend betrachten (vgl. Kapitel 3.3.6), hat die Firma Lorenz durch die Analyse des Produkts, die Kooperation mit Kunden und langfristig angelegte Investitionen einen Markt für aufgearbeitete Produkte geschaffen. Ein großer Teil des Produkts, wie das Gehäuse und die Mechanik, kann weit länger als die Eichzeit (und somit die eigentliche Lebenszeit eines Wasserzählers) genutzt werden. Das Produktdesign wird durch den Einsatz von leistungsfähiger Elektronik angepasst und dadurch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Austausch nötig wird, reduziert. Da die Elektronik die höchsten Umweltwirkungen der verbauten Komponenten hat, ist dies eine gezielte Investition in ein ökologisches Produktdesign. Durch die Weiternutzung vieler Komponenten können die Umweltwirkungen im Vergleich zur Herstellung von Neuware deutlich gesenkt werden. Im Basisszenario sind dies ca. 90 % für alle ausgewerteten Umweltindikatoren. Dieser Wert ist stabil über alle Sensitivitätsanalysen hinweg – selbst in der Worst-Case-Betrachtung der Aufarbeitung sind die Treibhausgasemissionen noch um 89 % niedriger als bei der Herstellung von Neuware.

Die Ergebnisse der Ökobilanz, der Rohstoffkritikalitätsanalyse und Kostenanalyse zeigen die signifikanten Vorteile des Remanufacturing. Dies konnte erzielt werden durch die Beurteilung der Randbedingungen des Produktlebenszyklus, wie die Sicherstellung der Funktion, attraktive Preisgestaltung und sichere Lieferfähigkeit, und die positive Ausrichtung an Möglichkeiten, wie durch die Kooperation mit Lieferanten, Kunden und Logistik. Den Kun-

den wird ein funktionsäquivalentes Produkt geboten, was durch die erstattete Rückvergütung zu niedrigeren Kosten als die Anschaffung von Neuware führt und gleichzeitig ökologischer ist.

6.2 Handlungsempfehlungen

Es wird deutlich, dass die größten Herausforderungen für Remanufacturing in der Komplexität des Themas liegen. Ein kreislauffähiges Produktdesign allein ist nicht ausreichend. Vielmehr müssen Sammel- und Rückführsysteme vorhanden sein, es müssen dazu passende Geschäftsmodelle entwickelt werden und die Rahmenbedingungen müssen stimmen oder zumindest Potenziale aufzeigen. Daher sind vor der Einführung von Remanufacturing eine umfassende Analyse und Planung erforderlich. Nur auf dieser Grundlage lassen sich Produkte, Sammelsysteme und Geschäftsmodelle systematisch unter Berücksichtigung der gegebenen Rahmenbedingungen entwickeln bzw. identifizieren und anwenden.

Um den Status quo zu analysieren, empfiehlt sich eine Analyse der vier Hauptaspekte. Die in Kapitel 3 dargestellte Bewertungsmatrix ist hierfür ein geeignetes Werkzeug. Die Kombination aus quantitativer und qualitativer Bewertung ermöglicht es, Schwachstellen und Herausforderungen in aktuellen oder künftigen Produkten und Geschäftsmodellen frühzeitig zu identifizieren. Darüber hinaus bietet sie eine Grundlage, Potenziale für die Entwicklung von kreislauffähigen Produkten und Geschäftsmodellen zu identifizieren.

Erst danach sollte mit der Entwicklung kreislauffähiger Produkte und Geschäftsmodelle begonnen werden, und zwar mit Betrachtung des gesamten Lebenszyklus. Abgeleitet aus Kapitel 4.3 stellt Abbildung 20 den empfohlenen Ablauf dazu dar. Durch die Einbeziehung aller Lebenszyklusphasen im Unternehmen kann die Produktentwicklung systematisch unterstützt und können die Produkte gezielt auf ihre Kreislauffähigkeit hin geprüft werden. Im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse wird ein Produkt inklusive aller vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsschritte analysiert. Dadurch wird vermieden, dass potenzielle Herausforderungen am Lebensende – in diesem Fall also bei der Aufarbeitung – übersehen oder überbewertet werden. Das Lebenszyklusmodell kann auch auf ökonomische Analysen übertragen wer-

den. So können Aspekte bewertet werden, die außerhalb der klassischen betrieblichen Betrachtungsgrenzen liegen, zukünftig aber eine Rolle spielen werden, wie beispielsweise CO_2-basierte Steuermechanismen. Folglich können Schwachstellen von Produktsystemen objektiv erkannt werden. Indikatoren dafür sind typische Wirkungskategorien aus Ökobilanzen. Im Rahmen der Weiterentwicklung von Produkten und Geschäftsmodellen werden Stellschrauben identifiziert, welche die Schwachstellen beeinflussen und die daraus resultierenden Effekte einer Anpassung dieser Parameter auf das gesamte System simulieren. Durch die umfassende Betrachtung der Umweltwirkungen im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse wird ein umfassender Überblick nicht nur über die ökologischen, sondern auch über die ökonomischen Aspekte von Produktvarianten gegeben. Geeignete Produktvarianten werden anschließend mit Methoden der Lösungsfindung und Kreativitätsförderung in reale Bedingungen übertragen und aus verschiedenen Blickwinkeln kritisch hinterfragt. Ziel ist es hierbei, die vielversprechendsten Ansätze zu identifizieren und für diese Geschäftsmodelle abzuleiten. Lebenszyklus- und Schwachstellenanalysen können durch jedes Unternehmen erfolgen, da dieser Prozess vollkommen intern abläuft.

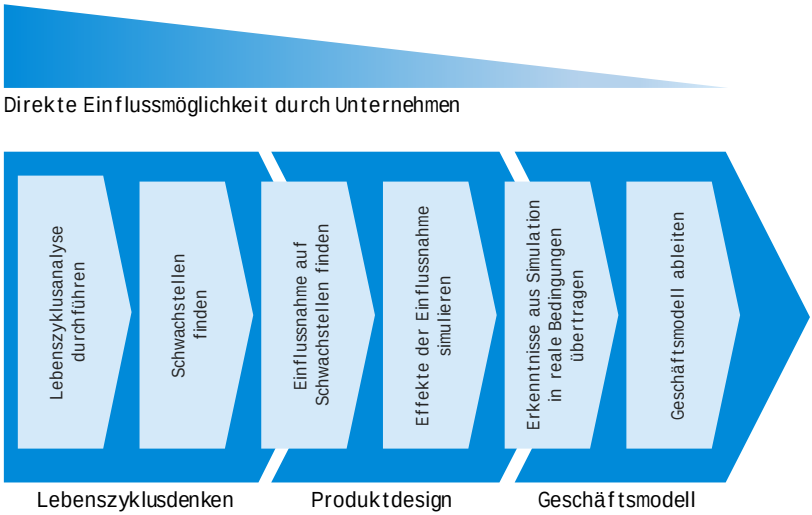

Abbildung 20: Entwicklung von kreislauffähigen Produkten und Geschäftsmodellen

Entlang dieses Prozesses verringern sich typischerweise die Möglichkeiten, die ein einzelnes Unternehmen beeinflussen kann. Vor der Anpassung von Produkten und Wertschöpfungsketten müssen oft schon während des Produktdesigns oder bei der Herstellungsphase externe Faktoren wie die Kompatibilität zu vorherigen Produktgenerationen oder bereits von Kunden genutzten Produkten mitberücksichtigt werden. Die Entwicklung eines Geschäftsmodells wird vom Produktdesign und von den daraus resultierenden Sammel- und Rückführsystemen stark beeinflusst. Daher müssen diese mitberücksichtigt werden. Einfluss können beispielsweise allgemeine Markttrends haben, die Zahlungsbereitschaft von Kunden, das Angebot an Konkurrenzprodukten oder Kosten von vor- und nachgelagerten Prozessschritten (Einkauf von Komponenten, Logistikkosten, Entsorgungskosten).

Weitere Faktoren, die kaum von einzelnen Unternehmen beeinflusst werden können, sind: die Wahrnehmung von aufgearbeiteten Produkten durch Kunden und Gesellschaft, gesetzliche Rahmenbedingungen, z. B. bezüglich Gewährleistung und Entsorgung, sowie das Angebot an qualifizierten Mitarbeitern. An dieser Stelle sind Politik und Verbände gefragt, um Rahmenbedingungen zu schaffen, die für Remanufacturing förderlich sind.

Die Entscheidung, Rahmenbedingungen anzupassen, kann nach dem Durchlaufen des empfohlenen Prozesses faktenbasiert erfolgen: Anhand einer Lebenszyklusanalyse können Unternehmen quantitative Nachweise über die Vorteilhaftigkeit von Remanufacturing liefern und die Politik kann somit faktenbasierte Entscheidungen treffen. Dies kann z. B. durch finanzielle und regulatorische Rahmenbedingungen zur Förderung einer kreislaufbasierten und nachhaltigen Wirtschaft erreicht werden, wie beispielsweise der Green Deal der Europäischen Union (vgl. Kapitel 2.1.3). Die gewonnenen Informationen können zur konkreten Ausgestaltung der Richtlinien auf europäischer und nationaler Ebene auf Basis nachvollziehbarer und belastbarer Informationen herangezogen werden. Auch kann auf dieser Grundlage ein Wertewandel durch Information und Aufklärung in der Öffentlichkeit unterstützt werden, damit die Akzeptanz gegenüber aufgearbeiteten Produkten steigt und ein Bewusstsein geschaffen wird, dass Remanufacturing zugleich ökologische und ökonomische Vorteile schafft, wie in Kapitel 5 dargestellt. Letztendlich ist ein solcher Wertewandel ein entscheidender Faktor für den erfolgreichen Wandel hin zu einer kreislauffähigen Wirtschaft. Wenn im öffentlichen Bewusstsein Kreislauffähigkeit, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit zu zentralen Entscheidungskriterien werden, führt dies zu einer stärkeren Nachfrage nach aufgearbeiteten Produkten. Wird dies durch finanzielle und regulatorische Rahmenbedingungen unterstützt, ist es für Unternehmen wiederum deutlich einfacher, kreislauffähige Produkte und Geschäftsmodelle zu entwickeln und erfolgreich am Markt zu positionieren.

Zusammenfassend lassen sich als Kernbotschaft folgende drei Handlungsempfehlungen gleichermaßen für industrielle Akteure wie für Politik und öffentliche Hand geben:

Information

Das Wissen und Verständnis über Vor- und Nachteile des Remanufacturing müssen auf der Basis des gesamten Lebenszyklus erfolgen. Erkenntnisse daraus müssen verbreitet werden, um fortführendes Umdenken zu initiieren. Dies gilt für Industrie (Erkennen neuer profitabler Geschäftsmodelle) und Politik (Wertwahrnehmung, Einfordern, Fördern) in gleicher Weise. Hebel und Maßnahmen werden sich jedoch entsprechend den jeweiligen Motivatoren aus Industrie und Politik unterscheiden, siehe dazu Abschnitt Kollaboration.

Innovation

Das Wechselspiel zwischen technischen Maßnahmen (Design und Logistik) und Geschäftsmodellen zum Remanufacturing kann selbstständig erfolgen. Mögliche Herangehensweisen, basierend auf dem Lebenszyklusgedanken, wurden im Zuge der Studie vorgestellt. Aber Innovationen sind kein Selbstläufer hin zu einer Kreislaufwirtschaft. Insofern müssen aus Industriesicht äußere Randbedingungen, z. B. durch Staat und Politik, so unterstützt werden, dass sich Innovationen in die richtige Richtung entwickeln können. Dazu gehören beispielsweise Aspekte des Green Deal wie steuerliche Maßnahmen (unter Einbeziehung der Internalisierung externer Umwelteffekte), Anreizsysteme, Kriterien bei öffentlicher Beschaffung, Indikatoren zur Zielerreichung und geeignete Kriterien und Programme zur Forschungsförderung.

Kollaboration

Agieren in Lebenszyklen ist immer mit Zusammenarbeit verbunden. Aus Industriesicht und bezogen auf den Produktlebenszyklus umfasst dies alle Akteure, die mit dem Produkt im Zuge seines Lebenszyklus in Verbindung stehen. Hierzu zählen für einen Hersteller sowohl interne Akteure wie beispielsweise verschiedene Unternehmenseinheiten (Vertrieb, Entwicklung, Marketing, Einkauf) als auch externe Akteure (Lieferanten, Nutzer oder Entsorger). Dies bedeutet einerseits für die internen Akteure, dass sie bei der Entwicklung und Planung den gesamten Lebenszyklus berücksichtigen und hinsichtlich der unterschiedlichen Einheiten wie Beschaffung, Fertigung und Vertrieb (z. B. durch gemeinsame Incentivierung auf ein Gesamtoptimum) zusammenarbeiten. Anderseits müssen sie sich mit externen Akteuren abstimmen, z. B. mit Kunden, Lieferanten, Logistikern und nicht zuletzt mit Kommunen und der öffentlichen Hand. Als Werkzeuge stehen ihnen Informationsvermittlung und Innovationen zur Verfügung. Die Politik sollte Kollaborationen bilden, z. B. durch Plattformen zur Zusammenarbeit (Forschung, Märkte, öffentliche Beschaffung, Gesellschaft), oder ministerienübergreifende Abstimmungen zu Programmen und Maßnahmen durchführen. Eine marktfähige Kreislaufwirtschaft sorgt nicht nur für die Schaffung optimaler Randbedingungen für Einzelakteure, sondern erfordert die Zusammenarbeit aller Akteure, um Systeme zu optimieren.

LITERATURVERZEICHNIS

Atmosfair (2020): CO_2-Fußabdruck kompensieren [online]. atmosfair GmbH, Berlin, [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: https://www.atmosfair.de/de/kompensieren/wunschmenge/

Bindel, R. (2017): Circular Economy [online]. factor^y – Magazin für nachhaltiges Wirtschaften, **13**(1.2017) [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: https://www.factory-magazin.de/fileadmin/magazin/media/circulareconomy/factory_1_2017_circular_ec_web.pdf

Buchberger, S.; Hofbauer, G.; Mangold, L. und Truong, K. (2019): Das Konzept der Circular Economy als Maxime für Beschaffung und Vertrieb in der Industrie. Technische Hochschule Ingolstadt, Heft Nr. 46, ISSN 1612-6483.

Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J. und Westkämper, E. (2009): Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-72136-9.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. 1. Auflage, BMUB, Berlin, auch verfügbar als PDF unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1994): Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW/AbfG). BGBI I 2705, Bonn.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020): Gesetzesentwurf eines Gesetzes zur Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union, Berlin [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: https://www.bmu.de/gesetz/856/

Clark, Ch. H. (1989): Brainstorming: How to Create Successful Ideas. Wilshire Book Company, ISBN 0-87980-423-8.

Dilts, R. B.; Epstein, T. und Dilts, R. W. (1994): Know-how für Träumer: Strategien der Kreativität, NLP & modelling, Struktur der Innovation. Junfermann Verlag, Paderborn, Pragmatismus & Tradition, Band 31, ISBN 3-87387-037-1.

DIN EN ISO 14040:2006: Deutsches Institut für Normung e. V., Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN ISO 14044:2006: Deutsches Institut für Normung e. V., Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Ellen MacArthur Foundation (2013a): Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Ellen MacArthur Foundation, auch verfügbar als PDF unter: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf

Ellen MacArthur Foundation (2013b): Towards the circular economy. Journal Industrial Ecology **1**(1), S. 4 – 8.

Ellen MacArthur Foundation (2017): Building Blocks – Circular economy design, business models, reverse cycles and enabling conditions are essential [online]. Ellen MacArthur Foundation [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/building-blocks

Europäische Kommission (2020): Ein europäischer Grüner Deal [online]. Europäische Kommission [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de

Eurostat SBS (2020): Structural business statistics (SBS) and global business activities [online]. European Commission [abgerufen am: April 2020], verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/scoreboards/BSP/

Fasko, R. (2015): Geschäftsmodelle zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft. sanu durabilitas – Stiftung für Nachhaltige Entwicklung, Biel und Münsingen, Schweiz.

Freiberger, S. (2007): Prüf- und Diagnosetechnologien zur Refabrikation von mechatronischen Systemen aus Fahrzeugen. Dissertation, Reihe: Fortschritt in Konstruktion und Produktion, Band 6, Shaker Verlag, Aachen.

Grepper, Y. (2018): Remanufacturing – Maschinen wie neu geboren. Container Magazin, Ausgabe 13, auch verfügbar als PDF unter: https://www.getag.ch/wp-content/uploads/2018/04/Kundenzeitung_Container_D_screen.pdf

Guide, V. D. R. und Wassenhove, L. N. V. (2009): The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research. Operation Research, **57**(1).

Herrmann, H. (2020): Expertenbefragung mit Herrn Herrmann, Geschäftsführer der Firma Herrmanns GmbH, Hailtingen.

Higgins, J. M. und Wiese, G. G. (1996): Innovationsmanagement – Kreativitätstechniken für den unternehmerischen Erfolg. Springer, Berlin, ISBN 3-540-60572-X.

Horst, H. (2020): Expertenbefragung mit Herrn Horst, Geschäftsführer der Firma ELiProCoM GmbH, Grasbrunn (München).

Hütter, A. (2016): Güterverkehr in Deutschland 2014 [online]. Destatis [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Methoden/WISTA-Wirtschaft-und-Statistik/2016/01/gueterverkehr-deutschland-2014-012016.html?__blob=publicationFile

IEC 63077:2019-01 (Entwurf): International Electrotechnical Commission, Good refurbishment practices for medical imaging equipment. VDE Verlag GmbH, Berlin.

IKEA (2019): Designing for circularity and our future [online]. IKEA Schweden [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: https://newsroom.inter.ikea.com/publications/designing-for-circularity-and-our-future/s/20f17dff-c43f-46c9-a5d4-be766859b760

Ionaşcu, I. und Ionaşcu, M. (2018): Business models for circular economy and sustainable development: The case of lease transactions [online]. Amfiteatru Economic Journal, **20**(48), S. 356 – 372 [abgerufen am: April 2020], verfügbar unter: http://dx.doi.org/10.24818/EA/2018/48/356

IPCC (2013): Climate Change: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland.

Kirchherr, J.; Reike, D. und Hekkert, M. (2017): Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions [online]. Resources, Conservation & Recycling, **127**(Dezember 2017), S. 221–232 [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005

Lange, U. (2017): Ressourceneffizienz durch Remanufacturing – Industrielle Aufarbeitung von Altteilen. VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 18, auch verfügbar als PDF unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/VDI_ZRE_Kurzanalyse_18_Remanufacturing_bf.pdf

Liebherr (2020): Remanufacturing – Das Reman-Programm von Liebherr. Liebherr-Ettlingen GmbH, auch verfügbar als PDF unter: https://www.liebherr.com/shared/media/komponenten/dokumente/reman-programm/liebherr-reman-programm-de.pdf

Lindahl, M.; Sundin, E. und Östlin, J. (2006): Environmental Issues within the Remanufacturing Industry. Proceedings of LCE2006, 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, S. 447 – 452.

Mauss, W. (2020): Expertenbefragung mit Herrn Mauss, Geschäftsführer der Firma Lorenz GmbH & Co KG, Schelklingen-Ingstetten.

Minol (2019a): Minol informiert – Eichung von Messgeräten. Brunata Minol, auch verfügbar als PDF unter: https://www.minol.de/informiert-pdf.html?file=files/download-internet/minol-informiert/Minol_informiert_Eichung_von_Messgeraeten.pdf

Minol (2019b): Minol informiert – Funktion von Wasserzählern. Brunata Minol, auch verfügbar als PDF unter: https://www.minol.de/informiert-pdf.html?file=files/download-internet/minol-informiert/Minol_informiert_Funktion_von_Wasserzaehlern.pdf

Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S.; Symington, H.; Tewson, J.; Jansson, K.; Ramkumar, S. und Peck, D. (2015): Remanufacturing Market Study. European Remanufacturing Network (ERN), auch verfügbar als PDF unter: https://www.remanufacturing.eu/assets/pdfs/remanufacturing-market-study.pdf

Sachse, P. und Specker, A. (1999): Design Thinking: Analyse und Unterstützung konstruktiver Entwurfstätigkeiten. vdf Hochschulverlag, Zürich, Reihe Mensch, Technik, Organisation, Band 22., ISBN 978-3-7281-2701-3.

Scheelhaase, T. und Zinke, G. (2016): Potenzialanalyse einer zirkulären Wertschöpfung im Land Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, auch verfügbar als PDF unter: https://broschuerenservice.nrw.de/files/download/pdf/potenzialanalyse-mweimh-2016-web-pdf_von_potenzialanalyse-bericht_vom_mwide_2361.pdf

Schmidt, G. (2000): Methode und Techniken der Organisation. 12. Auflage. Dr. Götz Schmidt, Gießen, ISBN 3-921313-62-7.

Sphera (2020a): GaBi – LCA Datenbank Dokumentation [online]. Sphera Solutions [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: http://www.gabi-software.com/deutsch/my-gabi/gabi-documentation/gabi-database-2020-lci-documentation/

Sphera (2020b): GaBi – LCA Software und Datenbanksystem für Ökobilanzen [online]. Sphera Solutions [abgerufen amabgerufen im: Juli 2020], verfügbar unter: http://www.gabi-software.com/deutsch/index/

Sphera (2020c): GaBi – LCA Software und Datenbanksystem für Ökobilanzen [online]. Sphera Solutions [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: http://www.gabi-software.com/deutsch/my-gabi/gabi-documentation/gabi-modellierungsprinzipien/

Sphera (2020d): Was ist eine Kreislaufwirtschaft? [online]. Sphera Solutions [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: https://sphera.com/glossary/what-is-a-circular-economy/

Steinhilper, R. (1998): Remanufacturing: The Ultimate Form of Recycling. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart, 1998, ISBN 3-8167-5216-0.

Steinhilper, R. (1999): Vielfachnutzung durch Mehrfachnutzung. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart, ISBN 3-8167-5307-8.

Technopolis Group (2016): Regulatory barriers for the Circular Economy: Lessons from ten case studies [online]. Technopolis Group in consortium with Fraunhofer ISI, thinkstep and Wuppertal Institute [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: https://ec.europa.eu/growth/content/regulatory-barriers-circular-economy-lessons-ten-case-studies_en

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2019): Zirkuläre Wertschöpfung – Remanufacturing und Instandhaltung [online]. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf [abgerufen am: Juli 2020], verfügbar unter: www.vdi.de/zirkulaere-wertschoepfung

VDI 2243:2002-07: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Recyclingorientierte Produktentwicklung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 2343 Blatt 1:2001-05: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Recycling elektrischer und elektronischer Geräte – Grundlagen und Begriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 2343 Blatt 2:2010-02: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Recycling elektrischer und elektronischer Geräte – Logistik. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 2343 Blatt 3:2009-04: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Recycling elektrischer und elektronischer Geräte – Demontage. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 2343 Blatt 4:2012-01: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Recycling elektrischer und elektronischer Geräte – Aufbereitung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 2343 Blatt 5:2013-04: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Recycling elektrischer und elektronischer Geräte – Stoffliche und energetische Verwertung und Beseitigung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 2343 Blatt 6:2019-02: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Recycling elektrischer und elektronischer Geräte – Vermarktung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 2343 Blatt 7:2013-04: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Recycling elektrischer und elektronischer Geräte – Re-use. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4600 Blatt 1:2015-08: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Kumulierter Energieaufwand. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 1:2016-02: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ressourceneffizienz; Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 2:2018-03: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Ressourceneffizienz; Bewertung des Rohstoffaufwands. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Waugh, R. (2020): persönliche Mitteilung von Frau Waugh, ERN, per Telefon am 8. April 2020.

Weber, T. und Stuchtey, M. (2018): Deutschland auf dem Weg zur Circular Economy Erkenntnisse aus europäischen Strategien (Vorstudie). acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München, auch verfügbar als PDF unter: https://static1.squarespace.com/static/5b52037e4611a0606973bc79/t/5d3a995a224e0e00016e7143/1564121437904/Circular_Economy_Web_final.pdf

Zwicky, F. (1966): Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild. Droemer Knaur, München/Zürich, ISBN 3426002647.

ANHANG - ÖKOLOGISCHE ERGEBNISSE

Tabelle 25: Ökologische Ergebnisse: Aufarbeitung

Wirkungs-kategorie	1 - Einfache Aufarbeitung	2 - Umfangreiche Aufarbeitung	3 - Best Case	4 - Worst Case	5 - TE Biogas	6 - TE Lastfrei	7 - Lange Trans-porte
Wasser-verbrauch	0,38013	1,47375	0,43842	1,48949	0,81427	0,65262	0,66927
Siedlungs-flächen	0,00002	0,00077	0,00003	0,00077	0,00020	0,00020	0,00020
Landwirt-schafts-flächen	0,00882	0,01339	0,03042	0,01427	0,03401	0,00996	0,01085
Metalle, Mineralien	0,52095	1,14232	0,02722	1,14433	0,66994	0,65824	0,67830
Energieroh-stoffe	0,05462	0,15445	0,00642	0,16161	0,07345	0,07242	0,08674
KEA, erschöpflich	1,51585	4,96768	0,25552	5,26953	2,10245	2,06443	2,68065
KEA, regenerativ	0,59536	0,97863	1,73906	0,99620	1,47373	0,69059	0,70875
Treibhaus-potenzial	0,11420	0,37520	0,02896	0,39775	0,16786	0,16004	0,20165

Tabelle 26: Ökologische Ergebnisse: Neuware

Wirkungs-kategorie	3 - Best Case	5 - TE Biogas	6 - TE Lastfrei	7 - Lange Transporte
Wasser-verbrauch	20,29	20,30	20,14	20,16
Siedlungs-flächen	0,01	0,01	0,01	0,01
Landwirtschafts-flächen	0,17	0,14	0,12	0,12
Metalle, Mineralien	39,46	40,65	40,64	40,66
Energierohstoffe	1,39	1,49	1,49	1,50
KEA, erschöpflich	46,42	48,87	48,83	49,60
KEA, regenerativ	12,34	10,29	9,51	9,53
Treibhaus-potenzial	3,68	3,85	3,84	3,89

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bülowstraße 78
10783 Berlin
Tel. +49 (0)30 2759506-0
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de