

# Die Entwicklung nachhaltiger Produkte

—

## Ein ganzheitlicher methodischer Ansatz der Nachhaltigkeitsbilanz

Am Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Marko Ćorić, M. Sc.

aus Mostar / Bosnien und Herzegowina

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl
Tag der Einreichung:	26. Januar 2016
Tag der mündlichen Prüfung:	14. Juni 2016

Darmstadt 2016

D17



## Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meines letzten Jahres als wissenschaftlicher Mitarbeiter am *Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der Technischen Universität Darmstadt (pmd)*. Das Ziel meines Forschungsvorhabens war die erstmalige Entwicklung und Evaluierung eines in Modellen und Vorgehen methodisch konsistenten Hilfsmittels zur Entwicklung nachhaltiger Produkte.

Die Nachhaltigkeit als Schlagwort steht im Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Ob Abgasskandale, Ökostrom oder Spekulationen mit Nahrungsmitteln, das Nachhaltigkeitsthema ist wie kein Anderes in den Medien präsent. Die Nachhaltigkeit ist zu einem Sinnbild des guten Gewissens der Menschheit geworden.

Dem können sich Unternehmen des produzierenden Gewerbes nicht entziehen. Anfang des 21. Jahrhunderts keimte die Bestrebung auf, Nachhaltigkeit als Teilaspekt der unternehmerischen Reputation zu etablieren. Von diesem neuen guten Gewissen sind sämtliche Unternehmensbereiche, besonders die Produktentwicklung, betroffen. Sie steht seitdem vor der Aufgabe, nachhaltige Produkte zu entwickeln. Umso erstaunlicher ist die fehlende wissenschaftliche Durchdringung des integrativen Nachhaltigkeitsgedankens und das fehlende wissenschaftliche Verständnis der ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Dimension, nicht nur im konstruktionsmethodischen Kontext.

Die Motivation dieser Arbeit stellt ein in der Öffentlichkeit und in der Wissenschaft vorherrschende diffuses Verständnis der Nachhaltigkeit dar. Es verhindert eine praktische Umsetzung der Entwicklung nachhaltiger Produkte.

Mein Dank gilt Frau Dr.-Ing. Andrea Bohn, die mich 2011 als ersten Mitarbeitenden für die Forschung an Mikro-Maschinenelementen am pmd eingestellt hatte und bis Anfang 2012 betreute. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. h. c. Dr. h. c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche. Sie unterstützten mich nach dem Ausscheiden von Frau Bohn bei der Forschung der für mich neuen Themengebiete der Nachhaltigkeit und der Produktentwicklung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Dem pmd-Team danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Mein besonderer Dank gilt den aktiven und ehemaligen KollegInnen des Arbeitsbereiches EcoDesign, die mich nach dem Ausscheiden von Frau Bohn in ihren Arbeitsbereich integrierten.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern. Sie haben mich durch die schwierige Zeit nach dem Wechsel der Mikro-Maschinenelemente-Forschung zu der Erforschung der Entwicklung nachhaltiger Produkte unterstützt und motiviert. Von ganzem Herzen danke ich meiner Verlobten Valetina Biletić, die in dieser schwierigen Zeit stets mein Licht am Ende des Tunnels war.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>II</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung der Arbeit .....	3
1.2 Exkurs: Zusammenhang zwischen Modellen und Methoden .....	4
1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit.....	8
<b>2 Stand der Forschung</b> .....	<b>11</b>
2.1 Das Partialmodell der Ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung ...	11
2.1.1 Das Partialmodell der Prozesse .....	14
2.1.2 Das Partialmodell des Produktlebenslaufes .....	18
2.1.3 Das Partialmodell der Produktentwicklung .....	24
2.2 Das Verständnis der Nachhaltigkeit .....	28
2.2.1 Die Dimensionen der Nachhaltigkeit .....	31
2.2.1.1 Die ökologische Dimension .....	32
2.2.1.2 Die ökonomische Dimension.....	34
2.2.1.3 Die gesellschaftliche Dimension .....	38
2.2.2 Beeinflussbarkeit und Antizipierbarkeit der Nachhaltigkeit .....	44
2.3 Anforderungen an eine Methodik der Entwicklung nachhaltiger Produkte ..	47
<b>3 Das Modell für die Entwicklung nachhaltiger Produkte</b> .....	<b>52</b>
3.1 Das Partialmodell der Technosphäre .....	54
3.1.1 Die Rohstoffgewinnung .....	58
3.1.2 Die Verarbeitungsprozesse .....	59
3.1.3 Bearbeitungsprozesse.....	59
3.1.4 Nutzung.....	60
3.1.5 Beseitigung.....	61
3.2 Das Partialmodell der Nachhaltigkeit aus Sicht der Produktentwicklung.....	62
3.2.1 Das Partialmodell der Ökosphäre.....	65
3.2.2 Die Partialmodelle der Ökonosphäre.....	70
3.2.2.1 Das Partialmodell der produktentwicklungsnahen Ökonosphäre .....	71
3.2.2.1.1 Das Partialmodell der Kosten während des Entstehungszyklus .....	72
3.2.2.1.2 Das Partialmodell des Umsatzes während des Marktzyklus .....	75
3.2.2.2 Das Partialmodell der Ökonosphäre des Kunden für Investitionsgüter .....	77
3.2.2.3 Das Partialmodell der Ökonosphäre des Kunden für Konsumgüter .....	79
3.2.2.4 Das Partialmodell der Ökosphäre des Beschaffungsmarktes.....	80
3.2.2.5 Das Partialmodell der Ökonosphäre der Beseitigungswirtschaft .....	81
3.2.3 Das Partialmodell der Soziosphäre .....	82
<b>4 Die Methodik der Nachhaltigkeitsbilanz</b> .....	<b>85</b>
4.1 Definition des Zieles und des Untersuchungsrahmens .....	86
4.2 Antizipieren der Transformationssysteme .....	87
4.3 Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte .....	88

---

4.3.1	Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte aus der Fabrikation .....	89
4.3.1.1	Synthese der ökologischen Indikatorwerte aus der Fabrikation .....	89
4.3.1.2	Synthese der ökonomischen Indikatorwerte aus der Fabrikation .....	92
4.3.1.3	Synthese der gesellschaftlichen Indikatorwerte aus der Fabrikation .....	93
4.3.2	Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte aus der Nutzung.....	95
4.4	Analyse .....	96
4.5	Operationalisierung .....	98
<b>5</b>	<b>Die Nachhaltigkeitsbilanzierung am Beispiel der alternativen Verwendung von Neuschrott .....</b>	<b>102</b>
5.1	Ausgangssituation der Produktentwicklung.....	102
5.2	Exkurs: Rechtliche Rahmenbedingungen der alternativen Verwendung...	107
5.3	Exkurs: Eine Methode des Antizipierens alternativer Verwendungen .....	111
5.4	Anwendung der Methodik der Nachhaltigkeitsbilanzierung.....	112
5.4.1	Das Ziel und der Untersuchungsrahmen .....	112
5.4.2	Antizipieren der Transformationssysteme .....	114
5.4.2.1	Antizipieren der Referenz.....	114
5.4.2.2	Antizipieren der alternativen Verwendung .....	121
5.4.3	Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte .....	122
5.4.3.1	Kostensenkungspotenzial für die produktentwicklungsnahen Ökosphäre.....	129
5.4.3.2	Nachhaltigkeitsindikatorwerte für das Marketing .....	130
<b>6</b>	<b>Evaluierung .....</b>	<b>131</b>
6.1	Die Anwendungsevaluierung .....	131
6.2	Die Erfolgsevaluierung .....	133
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>136</b>
<b>A</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>140</b>
A.1	Als Genom modellierte Methodenbeschreibung .....	141
A.2	Antizipierte Technosphären in Abschnitt 5.4.2 .....	142
A.3	Berechnungen und Datenbasen.....	144
A.3.1	Berechnungen zu Abschnitt 5.1.....	144
A.3.2	Datenbasis der gesellschaftlichen Charakterisierungsfaktoren .....	148
A.3.3	Synthetisierte Indikatorwerte .....	149
<b>B</b>	<b>Glossar.....</b>	<b>153</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen .....</b>	<b>158</b>
	<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>159</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>161</b>

## Abkürzungsverzeichnis

A	Ausgang
a. a. O.	am angegebenen Ort
AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
abiot.	abiotisch
AGWP	Absolute Global Warming Potential
AltfahrzeugV	Altfahrzeugverordnung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
biot.	biotisch
Bt-Drs	Bundestagsdrucksache
CC	Corporate Citizenship
Charak.	Charakterisierungsfaktor
CNC	Computerized Numerical Control
CSR	Corporate Social Responsibility
DATEV	Datenverarbeitungsorganisation der Steuerbevollmächtigten für die Angehörigen des steuerberatenden Berufes in der Bundesrepublik Deutschland
DIN	Deutsches Institut für Normung
DRM	design research methodology
E	Eingang
EN	Europäische Norm
ezgO	einfaches zweidimensionales geometrisches Objekt
Ferz	Flacherzeugnis
Ge	Geldeinheit
ggf.	gegebenenfalls
GoM	Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung
GPPe	Ganzheitliche Produkt- und Prozessentwicklung
GRI	Global Reporting Initiative
gV	Globale Variable
GWP	Global Warming Potential

---

HDI	Human Development Index
HGB	Handelsgesetzbuch
i. d. R.	in der Regel
InsO	Insolvenzordnung
ISO	International Standard Organisation
k	Konzept
LCA	life cycle assessment
LCC	life cycle costing
MIPS	Material-Input pro Serviceeinheit
MIt	Material-Intensität
Ns	Neuschrott
Nw	Nachhaltigkeitsindikatorwert
o	Operand
o. V.	ohne Verfasser
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
p	Prozess
Pkw	Personenkraftwagen
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme
ProdSG	Produktsicherheitsgesetz
Prosa	Product Sustainability Assessment
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
REFA	ehemals Reichsausschuss für Arbeitszeitregelung; heute Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
S. n. a.	Seite nicht angegeben
Sp	Servopresse
spez.	spezifisch
Ss	Scherschneiden
TCO	Total Cost of Ownership
Tz	Tiefziehen
u. a.	unter anderem

v	Verfahren
VDEh	Verein Deutscher Eisenhüttenleute
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VerpackV	Verpackungsverordnung
VI	Virtuelles Instrument
VW	Volkswagen
Z	Zwischen
z. B.	zum Beispiel
z. Z.	zur Zeit



## 1 Einleitung

Das integrative Modell der nachhaltigen Entwicklung definiert eine gleichzeitige Berücksichtigung der ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Aspekte.<sup>1</sup> Die nachhaltige Entwicklung wird als Prozess verstanden, der sowohl die Ressourcennutzung, die Investmentpolitik als auch die technologische und institutionelle Entwicklung wie auch die sich ändernden Bedürfnisse der Menschen verknüpft und berücksichtigt.<sup>2</sup> Ein ganzheitlich nachhaltiger Entwicklungsprozess erfolgt unter einer gleichrangigen und integrativen Berücksichtigung der ökonomischen, ökologischen wie auch der gesellschaftlichen bzw. sozialen Ziele und deren Wechselwirkungen.<sup>3</sup> Der integrative Nachhaltigkeitsgedanke ist erstmals im *Brundtland-Bericht* der *Weltkommission für Umwelt und Entwicklung* der Vereinten Nationen konzipiert worden.<sup>4</sup> Neben dem Gedanken der Generationengerechtigkeit wird der erste Grundstein für das integrative Modell der drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung gelegt.<sup>5</sup> Die Vereinten Nationen definieren 17 Ziele einer nachhaltigen Entwicklung<sup>6</sup>, die durch weitere Unterziele detailliert werden.<sup>7</sup> Eine nachhaltige Entwicklung verfolgt global<sup>8</sup> Ziele wie die Armutsbekämpfung<sup>9</sup>, das Verhindern von Mangelernährung<sup>10</sup>, den Schutz von Ökosystemen<sup>11</sup> oder die Förderung einer produktiven Vollbeschäftigung<sup>12</sup>. Die Nachhaltigkeit ist der durch das Erfüllen der Ziele der nachhaltigen Entwicklung erreichte Zustand.<sup>13</sup> Dieses Verständnis einer nachhaltigen Entwicklung wird auf die Entwicklung nachhaltiger Produkte<sup>14</sup> übertragen. Nachhaltige Produkte erfüllen die Bedürfnisse der heutigen Generation, ohne die Möglichkeit der Bedürfnisbefriedigung nachfolgender Generationen einzuschränken.<sup>15</sup> Während der Entwicklung nachhaltiger Produkte wird ein Kompromiss<sup>16</sup> zwischen ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen bzw. sozialen Produktwirkungen während des gesamten Produktlebenslaufes gefunden.<sup>17</sup>

Die Aufgabe der Produktentwicklung liegt darin, die Wirkung des realen Produktes auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit entsprechend dem Kompromiss durch Entscheidungen zu beeinflussen. Dadurch wird der gesamte Produktlebenslauf und seine

---

<sup>1</sup> Kopfmüller 2007, S. 17

<sup>2</sup> World Commission on Environment and Development 1987, Kap. I Abs. 30

<sup>3</sup> Vertrag von Amsterdam, Art. 1 Abs. 2; Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages 2004, S. 2; Enquete-Kommission 1998, S. 18

<sup>4</sup> Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages 2004, S. 1

<sup>5</sup> World Commission on Environment and Development 1987, S. Kap. I Abs. 27

<sup>6</sup> Die nachhaltige Entwicklung ist nicht mit der Entwicklung nachhaltiger Produkte oder der nachhaltigen Produktentwicklung zu verwechseln.

<sup>7</sup> United Nations 2014, S. 10ff.; Mengel et al. 2015, S. 15ff. analysieren und beurteilen die definierten Ziele.

<sup>8</sup> Global bedeutet, dass diese Ziele für die gesamte Erde mit ihren Gesellschaften, Volkswirtschaften und Ökosystemen definiert werden.

<sup>9</sup> United Nations 2014, S. 11

<sup>10</sup> United Nations 2014, S. 11f.

<sup>11</sup> United Nations 2014, S. 19ff.

<sup>12</sup> United Nations 2014, S. 15f.

<sup>13</sup> Grunwald und Kopfmüller 2006, S. 7

<sup>14</sup> In der Literatur wird häufig von einer nachhaltigen Produktentwicklung gesprochen, was einen ökologischen, ökonomischen und sozialen Produktentwicklungsprozess suggeriert. Mit der nachhaltigen Produktentwicklung ist zwar die Entwicklung nachhaltiger Produkte gemeint, was jedoch sprachlich irreführend ist.

<sup>15</sup> Ponn und Lindemann 2008, S. 256; Jäger 2007, S. 132

<sup>16</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 563 sprechen von einem Optimum.

<sup>17</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 563

Wirkung auf die Dimensionen der Nachhaltigkeit beeinflusst.<sup>18</sup> Die Wirkung der Teilprozesse des Produktlebenslaufes über die Entscheidungen während des Produktentwicklungsprozesses auf den nachhaltigen Zustand abzuschätzen, ist nicht trivial. Das liegt zum einen an dem sogenannten *Dilemma der Produktentwicklung*.<sup>19</sup> Auf der einen Seite wird zu Beginn der Produktentwicklung ein *Klären der Aufgabenstellung* mit anschließender Synthese der Produkthanforderungen durchgeführt. Die erfassten Anforderungen legen den Rahmen sinnvoller Lösungsmöglichkeiten für das zu entwickelnde Produkt<sup>20</sup> ohne einen nennenswerten Informationszuwachs fest.<sup>21</sup> Auf der anderen Seite nehmen mit voranschreitender Konkretisierung des zu entwickelnden Produktes der Gestaltungsspielraum bzw. die Änderungsmöglichkeiten mit steigendem Informationszuwachs ab.<sup>22</sup> Nach ZÜST kann das Dilemma der Produktentwicklung auch auf Umweltaspekte übertragen werden.<sup>23</sup> Während die Antizipierbarkeit der Umweltwirkung eines zu entwickelnden Produktes mit steigender Konkretisierung zunimmt, sinken die Einflussmöglichkeiten auf die Umweltwirkung der antizipierten Lebenslaufprozesse. Zum anderen steht der Produktentwicklung eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle und Methoden zur Abschätzung der Wirkung der Entscheidungen auf die Nachhaltigkeit eines zu entwickelnden Produktes zur Verfügung. Das Modell zur Bilanzierung der Umweltwirkung mithilfe der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 bzw. 14044 basiert auf Materialflüssen.<sup>24</sup> Ökonomische Kalkulationsmethoden wie die Materialkostenmethode oder die Ähnlichkeitskalkulation ziehen bestehende Produkte zur Abschätzung der Produktkosten heran.<sup>25</sup> Sozialbilanzen sind aufgrund der Datenlage, der fehlenden Modelle und der Anzahl an möglichen Sozial-Indikatoren schwer durchzuführen.<sup>26</sup> Aufgrund des weitgehend abstrakten Leitbildes der nachhaltigen Entwicklung gestaltet sich die Umsetzung einer Nachhaltigkeitsbilanzierung auf der Produktebene schwierig.<sup>27</sup>

Somit fehlt ein einheitliches Verständnis der Nachhaltigkeit von zu entwickelnden Produkten auf Grundlage eines einheitlichen und konsistenten Modelles. Das liegt nicht ausschließlich am fehlenden Verständnis des Einflussbereiches des Produktentwicklers auf die Nachhaltigkeit von Prozessen. Es fehlen Modelle zum Verständnis des Nachhaltigkeitsmodelles aus Sicht der Produktentwicklung an sich. So wird die Ent-

---

<sup>18</sup> VDI 2243, S. 2; Birkhofer et al. 2012, S. 566 beziehen sich auf die ökologische Dimension

<sup>19</sup> Curtius 1995, S. 90; Ehrlenspiel et al. 2013, S. 11; Wübbenhorst 1986, S. 88 bezeichnet die Diskrepanz zwischen den verfügbaren Informationen als Entscheidungsgrundlage und der Möglichkeit der Beeinflussung als *charakteristisches Problem des Produktlebenszyklus*.

<sup>20</sup> Mit dem Terminus des *zu entwickelnden Produktes* wird verdeutlicht, dass das Produkt während der Produktentwicklung nicht real bzw. physisch sondern virtuell in Form von Produktmodelle unterschiedlicher Konkretisierung vorliegt. Das reale Produkt wird entsprechend dem Verständnis als absetzbares Erzeugnis als *Produkt* bezeichnet.

<sup>21</sup> Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 39ff., in der Produktmodellpyramide wird den Anforderungen kein Informationszuwachs durch eine Kante der Grundfläche zugewiesen.

<sup>22</sup> Curtius 1995, S. 90

<sup>23</sup> Züst 1998, S. 174; Lang-Koetz et al. 2006, S. 419f.

<sup>24</sup> DIN EN ISO 14040, S. 10ff.; Müller und Schneidewind 2008, S. 170

<sup>25</sup> Ehrlenspiel et al. 2013, S. 457ff.

<sup>26</sup> u. a. Dubielzig 2009, S. 13ff.; Grießhammer et al. 2007, S. 174f.; Kloepffer 2008, S. 89

<sup>27</sup> Griesshammer et al. 2004, S. 43f.; Rat für Nachhaltige Entwicklung 2004, S. 24

wicklung nachhaltiger Produkte mit der Maßnahme der Ressourcenschonung gleichgesetzt.<sup>28</sup> Eng mit der Interpretation der Nachhaltigkeit über die Ressourcenschonung sind die ökologischen Strategien Effizienz, Konsistenz und Suffizienz zum Erreichen eines nachhaltigen Zustandes verbunden.<sup>29</sup> Viele Ansätze nehmen zur Bewertung von zu entwickelnden Produkten und Konzepten formal Bezug auf die Nachhaltigkeit, benutzen den Begriff ausschließlich als Schlagwort und beschränken sich bei der Betrachtung auf ökologische Aspekte.<sup>30</sup> Beispielsweise nehmen PONN UND LINDEMANN bei ihren Ausführungen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte ausschließlich Bezug auf die ökologischen Aspekte.<sup>31</sup> ALLWOOD ET AL. gehen bei ihrer Betrachtung nachhaltiger Materialien ausschließlich auf die Umweltwirkung ein.<sup>32</sup> VDI 4800 sieht in den unternehmensspezifischen Motiven eines ressourceneffizienten Handelns u. a. die „Einführung eines Umwelt-/Nachhaltigkeitsmanagementsystems“<sup>33</sup> und die „Herausgabe eines Umwelt-/Nachhaltigkeitsberichts“<sup>34</sup>.<sup>35</sup> Zudem sind vorhandene ganzheitliche Methoden bzw. Methodiken nicht während der Produktentwicklung anwendbar. Beispielsweise ist die Methodik *Product Sustainability Assessment (Prosa)* ausschließlich für die Analyse und Bewertung von bestehenden Produktportfolios, Produkten und Dienstleistungen im Vorfeld der eigentlichen Produktentwicklung geeignet.<sup>36</sup> Sie verwenden vorhandene Methodiken oder Vorgehen wie die Ökobilanz oder die Lebenszyklus-Kosten-Rechnung,<sup>37</sup> die nicht für den Einsatz während der Produktentwicklung konzipiert worden und entsprechend nicht uneingeschränkt geeignet sind. YUN-HEE ET AL. definieren in ihren Leitlinien zur Entwicklung nachhaltiger Produkte Produktmerkmale wie einen für jedermann erschwinglichen Produktpreis, die Produktästhetik, die Verwendbarkeit des Produktes und die Verwendung von inländischen Materialien für das Produkt.<sup>38</sup> Somit fehlt ein konsistentes und an die Produktentwicklung angepasstes Daten-, Modell- und Methodenwissen zur Umsetzung der Entwicklung nachhaltiger Produkte unter Berücksichtigung aller drei Dimensionen.

## 1.1 Zielsetzung der Arbeit

Die Intention dieser Arbeit setzt an dem in Abschnitt 1 hergeleiteten fehlenden Daten-, Modell- und Methodenwissen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte an. Die Grundlagen zur Analyse der Nachhaltigkeit von Produkten bilden die zur Verfügung stehenden

<sup>28</sup> Jäger 2007, S. 132; Pufé 2012a, S. 13

<sup>29</sup> Otto 2007, S. 50ff.

<sup>30</sup> Rüdener et al. 2002, S. 3ff.; im englischsprachigen Raum werden nach McLennan 2004, S. 1ff. *sustainable design* mit *environmental design* gleichgesetzt.

<sup>31</sup> Ponn und Lindemann 2011, S. 273ff.

<sup>32</sup> Allwood et al. 2014, S. 2ff, insbesondere Allwood et al. 2014, S. 19

<sup>33</sup> VDI 4800 Blatt 1, S. 7

<sup>34</sup> VDI 4800 Blatt 1, S. 7

<sup>35</sup> Nach o. V. 2006, § 106 kennzeichnet der Schrägstrich „die Angaben mehrerer (alternativer) Möglichkeiten im Sinne einer Verbindung mit *und*, *oder*, *bzw.*, *bis* oder dergleichen [...]“. Die Verknüpfung des Umweltmanagementsystems und des Nachhaltigkeitsmanagementsystems bzw. Umweltberichts und des Nachhaltigkeitsberichts über einen Schrägstrich widerspricht der Tatsache, dass die Umweltaspekte einer echten Teilmenge der Nachhaltigkeit entspricht.

<sup>36</sup> Grießhammer et al. 2007, S. 50ff.

<sup>37</sup> Klöpffer 2003, S. 158f.

<sup>38</sup> Yun-hee et al. 2009, S. 3

Informationen bzw. Daten entsprechend dem Konkretisierungsgrad des zu entwickelnden Produktes während der Produktentwicklung. Die elementaren Konstruktionseigenschaften bzw. die unabhängigen Eigenschaften<sup>39</sup> eines zu entwickelnden Produktes wie die Art des Werkstoffes oder das Nennmaß bedingen nicht nur die Produkteigenschaften für den Einsatz. Von ihnen sind auch die wirtschaftlichen Eigenschaften, die Wirkung auf die Umwelt sowie die auf die Gesellschaft abhängig. Um die von der Produktentwicklung festgelegten unabhängigen Eigenschaften in die abhängigen Nachhaltigkeitseigenschaften zu individualisieren, sind entsprechende Modelle erforderlich. Die Kombination aus den vorhandenen Daten der jeweiligen Produktkonkretisierung und diesen Modellen zur Individualisierung dieser Daten bildet ein Vorgehen in Form einer Methode ab. Dadurch wird eine für die Wirkungsabschätzung des Produktes auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit redundante und aufwendige Datenerhebung vermieden. Das Ziel dieser Arbeit lässt sich durch die Erarbeitung einer produktentwicklungsbegleitenden Methodik zur Abschätzung der Wirkung des zu entwickelnden Produktes auf die Nachhaltigkeit entlang des gesamten Produktlebenslaufes zusammenfassen. Dabei müssen insbesondere die Modelle und das Vorgehen an Gegebenheiten der Produktentwicklung angepasst sein. Zur Abschätzung der Wirkung eines zu entwickelnden Produktes auf die Dimensionen der Nachhaltigkeit werden ausschließlich relevante Indikatoren und Kennzahlen herangezogen, „[...] die von den variierten Aktionsparametern funktional abhängig sind“<sup>40</sup>. Aspekte bzw. Aktionsparameter, die durch die Produktentwicklung über unabhängige bzw. abhängige Eigenschaften nicht antizipierbar bzw. beeinflussbar sind, werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

## 1.2 Exkurs: Zusammenhang zwischen Modellen und Methoden

Entsprechend dem Titel der Arbeit wird ein methodischer, also ein in Modellen und Vorgehen konsistenter und durchgehender, Ansatz der Nachhaltigkeitsbilanz angestrebt. Allgemein sind Modelle pragmatische Abbildungen. Eine Methode ist ein Vorschlag einer Abfolge von Arbeitsschritten zur Lösung von Problemen.<sup>41</sup> Sie entspricht einem Vorgehen mit auf das Vorgehen angepassten Modellen zur Problemlösung.<sup>42</sup> Die Methode repräsentiert einen durchzulaufenden Prozess.<sup>43</sup> Demzufolge ist zur Erarbeitung eines methodischen Ansatzes der logische Zusammenhang zwischen dem Modell und dem dazugehörigen Vorgehen einer Methode zu klären.

Allgemein sind Modelle pragmatische Abbildungen. Dieses durch STACHOWIAK beschriebene Abbildungsmerkmal eines Modelles spiegelt den Zusammenhang zu

---

<sup>39</sup> Hubka 1973, S. 79f.; Hubka 1973, S. 67 versteht unter den elementaren Konstruktionseigenschaften „[...] die Mittel des Konstrukteurs, mittels deren er alle anderen Eigenschaften [eines Produktes] erzielt.“; Hubka 1984, S. 101, Ponn und Lindemann 2011, S. 133, Birkhofer und Wäldele 2008, S. 22ff., sinngleich auch in Gramlich 2013, S. 121 und VDI 2223, S. 12ff. bezeichnen die elementaren Konstruktionseigenschaften als unabhängige Eigenschaften, die die abhängigen Eigenschaften eines Produktes bedingen. Im Folgenden wird nur noch die Terminologie der unabhängigen Eigenschaften als Synonym der elementaren Konstruktionseigenschaften verwendet.

<sup>40</sup> In Anlehnung an die Definition von relevanten Kosten nach Kilger et al. 2012, S. 167.

<sup>41</sup> Pólya 1971, S. xvi–xvii; Pólya 1971, S. 21; Pólya 1971, S. 172; Pólya 1971, S. 219; sinngleich Lindemann 2007, S. 331; Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 748;

<sup>42</sup> Lindemann (2007), S. 59

<sup>43</sup> Berger 2004, S. 36ff.

einem Original wider, wobei das Original auch ein Modell sein kann.<sup>44</sup> Das Modell erfasst nicht alle Eigenschaften des Originales und verkürzt dieses. Das Verkürzungsmerkmal beschreibt die Betrachtung von Problemen durch getroffene Annahmen und gesetzte Systemgrenzen zur zweckmäßigen Verkürzung des Originales auf das Wesentliche.<sup>45</sup> Modelle sind ausschließlich für den gewählten Ausschnitt gültig und ermöglichen gültige Aussagen für den jeweiligen Zweck (pragmatisches Merkmal).<sup>46</sup> Sie werden sowohl zur Synthese<sup>47</sup> als auch zur Analyse genutzt. Modelle genügen den Anforderungen an die empirische und formale Richtigkeit, an die Anwendbarkeit in Bezug auf brauchbare Ergebnisse, an die Handhabbarkeit und den Aufwand.<sup>48</sup> Dabei werden nach DIN EN ISO 19439 unterschiedliche Modellspezialisierungsebenen unterschieden (vgl. Bild 1-1).<sup>49</sup>

Generisches Modell		
Datenbasis	Partialmodell	Individualmodell

**Bild 1-1: Modellspezialisierungsebenen und ihr Zusammenhang**

Das generische Modell<sup>50</sup> stellt ein Grundkonstrukt und formale Komponenten für eine systematische Modellierung bereit.<sup>51</sup> Beispielsweise wird die Darstellung der Produkte über Partialmodelle durch verbale Formulierungen, Formeln, Symbole oder durch eine Kombination aus diesen festgelegt. Das generische Modell wird über einen bestimmten Problemtyp über die Definition generischer Elemente zum Partialmodell<sup>52</sup> spezialisiert.<sup>53</sup> Es werden verwendbare Elemente wie Variablen oder die Syntax vorgegeben, wobei Partialmodelle<sup>54</sup> durch weitere Partialmodelle spezialisiert werden können. Eine Spezialisierung des Partialmodelles erfolgt über die Veränderung der Abbildungsmerkmale, Verkürzungsmerkmale und/oder der Merkmale des Pragmatismus. Ein Beispiel stellt die Abbildung der Teilprozesse der Produktentwicklung als Partialmodell dar, die je nach Konstruktionsart spezialisiert werden kann. Nach VDI 2210 werden für Neukonstruktionen die Teilprozesse des Planens, des Konzipierens, des Entwerfens und des Ausarbeitens durchlaufen.<sup>55</sup> Dieses Partialmodell der Produktentwicklung wird für eine Anpassungskonstruktion über die Verkürzung des Teilprozesses der Planung

<sup>44</sup> Stachowiak 1973, S. 131

<sup>45</sup> Stachowiak 1973, S. 132

<sup>46</sup> Stachowiak 1973, S. 132f.; Bossel 2004, S. 51

<sup>47</sup> Nach Pahl et. al. 2007, S. 75 ist die Synthese „[...] in ihrem Wesenskern Informationsverarbeitung durch Bilden von Verbindungen, durch Verknüpfen von Elementen mit insgesamt neuen Wirkungen und das Aufzeigen einer zusammenfassenden Ordnung.“

<sup>48</sup> Patzak 1982, S. 309f.; siehe auch die Grundsätzen ordnungsmäßiger Modellierung (GoM) nach Becker et al. 1995, S. 437ff.

<sup>49</sup> DIN EN ISO 19439, S. 21ff., durch Negele 2014, S. 33ff. auf die Produktentwicklung übertragen.

<sup>50</sup> I. d. R. wird bei einer Modellbildung die generische Ebene in der Konstruktionsforschung nicht betrachtet bzw. nicht eindeutig definiert bzw. dokumentiert. Daher wird im Folgenden auf die Betrachtung dieser Ebene verzichtet.

<sup>51</sup> Negele 2014, S. 57ff.

<sup>52</sup> Dieses hier beschriebene Partialmodell darf nicht mit dem Teilmodell, Untermodell oder Submodell („*partial model*“) nach Anderl und Melk 2005, S. 6f. verwechselt werden. Dort wird das Submodell, beispielsweise das Modell eines Teilprozesses des Produktlebenslaufes, als Teil eines übergeordnete Modelles, beispielsweise des Modelles des Produktlebenslaufes, verstanden.

<sup>53</sup> Negele 2014, S. 57ff.

<sup>54</sup> Speck 1998, S. 10 bezeichnet beispielsweise das Partialmodell zur Modellierung eines Produktes als Produktdatenmodell.

<sup>55</sup> VDI 2210, S. 8

spezialisiert.<sup>56</sup> Für die Variantenkonstruktion durchläuft die Produktentwicklung ausschließlich die Teilprozesse des Entwerfens und des Ausarbeitens.<sup>57</sup> Ein weiteres Beispiel stellt die Polynomfunktion  $f(x) = mx + b$  als Partialmodell dar. Bei dieser Funktion ersten Grades ist die Steigung  $m$  unabhängig von der Variablen  $x$ . Sowohl die Steigung  $m$  als auch die Konstante  $b$  als Nullpunktverschiebung können durch weitere Partialmodelle individualisiert werden. Somit kann diese Polynomfunktion als Partialmodell zu dem Partialmodell des Hookeschen Gesetzes oder einzelner Gerade des Break-even-Diagrammes spezialisiert werden. Bei der Spezialisierung ist stets auf die Konsistenz der Modellmerkmale zu achten. Das Partialmodell wird spezialisiert auf ein konkretes Problem angewendet.<sup>58</sup> Die verwendbaren Elemente werden anhand der Datenbasis durch eine Nomenklatur versehen, Variablen durch die Datenbasis individualisiert und die Gleichungen gelöst oder die Syntax ausformuliert. Werden in dem Partialmodell Konstanten benötigt, werden diese durch andere Individualmodelle bereitgestellt wie beispielsweise Naturkonstanten oder Charakterisierungsfaktoren (vgl. Abschnitt 2.2.1.1). Somit dient das Partialmodell einer Individualisierung<sup>59</sup> von der Datenbasis zum Individualmodell<sup>60</sup>. In Bild 1-1 wird die Abhängigkeit des Partialmodelles von der Datenbasis als „durchlässige“ Strichlinie dargestellt. Sie symbolisiert die Möglichkeit des Einsetzens der Datenbasis in das Partialmodell zur Individualisierung.

Eine Methode schlägt Rahmenbedingungen und Regeln zur Anwendung eines (Partial-) Modelles vor.<sup>61</sup> Ausgehend von der durch die Methode vorgegebenen Datenbasis wird eine Verbindung zu dem Unbekannten bzw. der Problemlösung gesucht.<sup>62</sup> Die Verbindung zwischen der Datenbasis und dem Unbekannten bildet das Partialmodell.<sup>63</sup> Somit liegt jeder Methode mindestens ein an die Datenbasis und dem zu lösenden Problem angepasstes Partialmodell zugrunde.<sup>64</sup> Entsprechend legt die Methode die Datenbasis und die spätere Darstellung des Individualmodelles fest. Eine Methodik ist ein „[...] planmäßiges Vorgehen unter Einschluss mehrerer Methoden, Arbeitsmittel (Hilfsmittel) und Instrumente.“<sup>65</sup>

Unterschiedliche Methoden können dieselben Partialmodelle verwenden, was an den Methoden *Anforderungsliste* und *Auswahlliste* gezeigt wird. Die Methode *Anforderungsliste* hat zum Ziel, die Entwicklungsaufgabe in eine für die Produktentwicklung verwendbare Sprache und Form zu überführen.<sup>66</sup> Dabei werden unterschiedliche

---

<sup>56</sup> VDI 2210, S. 8

<sup>57</sup> VDI 2210, S. 8

<sup>58</sup> Negele 2014, S. 57ff.

<sup>59</sup> Unter Berücksichtigung der Methode innerhalb einer Methodik als Prozess, transformiert das Partialmodell die Datenbasis zu einem Individualmodell. Um die terminologische Abgrenzung zu dem Transformationssystem nach Abschnitt 2.1.1 zu gewährleisten, wird in dieser Arbeit von der Individualisierung der Datenbasis über ein Partialmodell zu einem Individualmodell gesprochen.

<sup>60</sup> Speck 1998, S. 10 bezeichnet das Individualmodell als Produktmodell, das durch das Instanzieren des Produktdatenmodelles erzeugt wird.

<sup>61</sup> Berger 2004, S. 188ff.

<sup>62</sup> Pólya 1971, S. xvi–xvii

<sup>63</sup> Pólya 1971, S. 154f.; Pólya 1971, S. 182

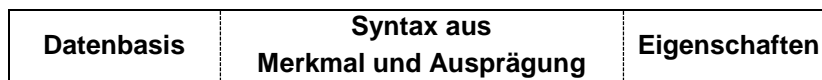
<sup>64</sup> Lindemann 2007, S. 58ff.

<sup>65</sup> VDI 2223, S. 88

<sup>66</sup> Pahl et al. 2007, S. 215

Quellen wie Lastenhefte, Kundenbefragungen, Benchmarks oder Normen und Gesetze durch die Methode *Anforderungsliste* vorgegeben. Das Ergebnis der Durchführung der Methode ist die Anforderungsliste. Das Individualmodell des zu entwickelnden Produktes wird über Anforderungen modelliert und bildet eine bestimmte Entwicklungsaufgabe in einer Liste aus Merkmalen und Ausprägungen ab.<sup>67</sup> Sie repräsentieren die Eigenschaften, die das zu reale Produkt haben soll.

Zur Auswahl von Konzeptvarianten durch die Methode *Auswahlliste* hinsichtlich des Kriteriums „Forderung der Anforderung erfüllt“<sup>68</sup>, sind die Konzeptvarianten analog zu der Entwicklungsaufgabe in der Form Merkmal mit dazugehöriger Ausprägung darzustellen. Die Kombinationen aus Merkmal und Ausprägung als Konzeptigenschaften entsprechen den Individualmodellen der Konzeptvarianten. Die Datenbasis bildet das Ergebnis der Konkretisierung von physikalischen Effekten zu Wirkprinzipien über abhängige durch unabhängige Eigenschaften. Bezüglich des Informationsumfanges und des Konkretisierungsgrades werden die Merkmale zu den Konzeptvarianten aus Gründen der Vergleichbarkeit entsprechend den Merkmalen der Forderungen der Anforderungsliste konkretisiert. Somit liegen den Anforderungen und den Eigenschaften der Konzeptvarianten das gleiche Partialmodell zugrunde (vgl. Bild 1-2). Das Partialmodell gibt eine Darstellung der Datenbasis durch eine Syntax aus Merkmal und Ausprägung hin zu Eigenschaften vor.



**Bild 1-2: Das Sprachmodell zur Modellierung von Anforderungen und Eigenschaften von Konzepten**

Erst die Methodenbeschreibung legt über die Handlungsanweisungen fest, welche Datenbasis bzw. welche weiteren Hilfsmittel heranzuziehen und welche Regeln bei der Durchführung der Methode zu beachten sind.<sup>69</sup> Das Eintragen und Sortieren der Merkmale mit den Ausprägungen in das Formular der Anforderungsliste, die Kategorisierung der Merkmale in Forderungen und Wünsche oder die Anweisung einer lösungsneutralen und positiven Formulierung der Anforderungen<sup>70</sup> werden beispielsweise durch die Methode *Anforderungsliste* vorgegeben.

Für diese Arbeit werden die Anforderungen *Konsistenz* und *Durchgängigkeit* an die zu erarbeitenden Partialmodelle und Methoden gestellt. Konsistenz bedeutet, dass mehrere Partialmodelle zur Modellierung desselben Systemes unter verschiedenen Sichtweisen keine Unvereinbarkeiten bzw. Widersprüche enthalten dürfen.<sup>71</sup> Die Partialmodelle sind durch ihren Aufbau und dem dazugehörigen Vorgehen produktentwicklungs-

<sup>67</sup> Ponn und Lindemann 2008, S. 35; Zier 2014, S. 95 bezeichnet dieses „Sammeln von Anforderungen“ als Elementaroperation „Auflisten“

<sup>68</sup> Pahl et al. 2007, S. 163

<sup>69</sup> Berger 2004, S. 188ff.

<sup>70</sup> Pahl et al. 2007, S. 119; Ponn und Lindemann 2008, S. 39

<sup>71</sup> Albers und Lohmeyer 2012, S. 412; Quirnbach 2001, S. 26; Avgoustinov 2007, S. 40ff.

begleitend anwendbar, was durch ALBERS UND LOHMEYER als *horizontale Durchgängigkeit* („*horizontal continuousness*“)<sup>72</sup> bezeichnet wird.<sup>73</sup> Weiterhin ermöglichen Partialmodelle entsprechend dem Dilemma der Produktentwicklung eine Anpassung der Granularität und des Detaillierungsgrades bzw. eine Spezialisierung, was als *vertikale Durchgängigkeit* („*vertical continuousness*“)<sup>74</sup> bezeichnet wird.

### 1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Zur wissenschaftlich fundierten Erarbeitung des in Abschnitt 1.1 vorgestellten Zieles dieser Arbeit stützt sich das Vorgehen auf die von BLESSING UND CHAKRABATI vorgestellte *Design Research Methodology (DRM)*. Das Vorgehen der DRM gliedert sich in die vier Stufen:<sup>75</sup>

1. Klärung der Forschungsziele
2. Erste deskriptive Stufe
3. Präskriptive Stufe
4. Zweite deskriptive Stufe

Dieses Kapitel 1 deckt nach der DRM die Klärung der Forschungsziele<sup>76</sup> ab. In Abschnitt 1 wird der Ist-Zustand und die sich daraus ergebende Notwendigkeit des Forschungsvorhabens beschrieben. Sie ergibt sich aus der fehlenden konstruktionsmethodischen Durchdringung der Entwicklung nachhaltiger Produkte unter Berücksichtigung aller drei Dimensionen. In Abschnitt 1.1 wird der Soll-Zustand durch das Forschungsziel detailliert und es werden Erfolgskriterien beschrieben. Dieser Abschnitt 1.3 beschreibt das Vorgehen und den Aufbau der Arbeit sowie die für diese Arbeit wichtigen Forschungsdisziplinen.

Kapitel 2 entspricht der ersten deskriptiven Stufe<sup>77</sup>. Der Fokus liegt sowohl auf der Literaturlaufbereitung zur Vertiefung des Problemverständnisses als auch dem Detailieren des Ist- und des Soll-Zustandes sowie der Erfolgskriterien. In Abschnitt 2.1 werden allgemeingültige konstruktionsmethodische Rahmenbedingungen erarbeitet, die zum Erreichen des Forschungszieles berücksichtigt werden. Die Produktentwicklung beeinflusst über die Prozesse des Produktlebenslaufes die Nachhaltigkeit des zu entwickelnden Produktes. Aus diesem Grund werden in Abschnitt 2.1.1 allgemeine konstruktionsmethodische Grundlagen und Modelle zur Analyse und Synthese von Prozessen beschrieben. In Abschnitt 2.1.2 werden bestehende Partialmodelle von Produktlebensläufen auf ihre Anwendbarkeit für die Entwicklung nachhaltiger Produkte und ihre Konsistenz bezüglich der Terminologie und der Systematisierung und Granulierung der Lebenslaufprozesse hin untersucht. Aufgrund des in Abschnitt 1 beschriebenen

---

<sup>72</sup> Albers und Lohmeyer 2012, S. 412

<sup>73</sup> Vgl. zum Begriff durchgängiger Modellierung auch Quirnbach 2001, S. 27; Gahr und Lindemann 2004, S. 161; Gausemeier et al. 2008, S. 65

<sup>74</sup> Albers und Lohmeyer 2012, S. 412

<sup>75</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 14ff. nach u. a. Blessing, Lucienne T. M et al. 1995, S. 52 f

<sup>76</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 29ff.

<sup>77</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 31ff.

fehlenden konstruktionsmethodischen Verständnisses einer Entwicklung nachhaltiger Produkte wird in Abschnitt 2.2 auf das Nachhaltigkeitsverständnis anderer Forschungsdisziplinen eingegangen. Dabei wird für die ökologische Dimension in Abschnitt 2.2.1.1 auf das Forschungsgebiet der Umweltwissenschaften und insbesondere auf die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 bzw. 14044<sup>78</sup> zurückgegriffen. Für die Vertiefung des Verständnisses der ökonomischen Dimension greift Abschnitt 2.2.1.2 auf den Stand der Forschung aus den Bereichen Wirtschafts- und Rechtswissenschaften zurück. Im Gegensatz zu den anderen beiden Dimensionen ist die gesellschaftliche Dimension der Nachhaltigkeit inhaltlich nicht ausgestaltet. In Abschnitt 2.2.1.3 wird daher ein allgemeines Verständnis auf Grundlage geistes- und sozialwissenschaftlicher Erkenntnisse erarbeitet. In Abschnitt 2.3, entsprechend den Zielen der ersten deskriptiven Stufe, werden basierend auf den erarbeiteten Ergebnissen Anforderungen an eine Methodik zur Entwicklung nachhaltiger Produkte dargelegt und darüber Erfolgsfaktoren beschrieben.

Entsprechend den Zielen der präskriptiven Stufe<sup>79</sup> werden in den Kapiteln 3 und 4 Lösungen für die in den vorangegangenen Stufen herausgearbeiteten Probleme vorgeschlagen. In Kapitel 3 werden die in dieser Arbeit entwickelten konstruktionsmethodischen und allgemeingültigen Partialmodelle des Produktlebenslaufes und der einzelnen Dimensionen der Nachhaltigkeit sowohl terminologisch als auch mathematisch analog zu dem generischen Modellverständnis nach Abschnitt 1.2 hergeleitet. Dabei wird insbesondere auf den Zusammenhang zwischen dem Antizipieren und Beeinflussen des Produktlebenslaufes durch die Produktentwicklung hinsichtlich der Nachhaltigkeitsaspekte eines zu entwickelnden Produktes Augenmerk gelegt. In Kapitel 4 wird auf Grundlage der erarbeiteten Modelle die *tatsächliche Unterstützung* („*actual support*“)<sup>80</sup> für die Entwicklung nachhaltiger Produkte in Form einer Methodik und ihre Operationalisierbarkeit dokumentiert.

Kapitel 5 und 6 dokumentieren die zweite deskriptive Stufe<sup>81</sup> über die Fähigkeit der bereitgestellten Unterstützung zur Entwicklung nachhaltiger Produkte unter Berücksichtigung der drei Dimensionen zum Erreichen des Soll-Zustandes. Da in der Literatur Vorgehen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte unter Berücksichtigung der drei Dimensionen gänzlich fehlen und die zweite deskriptive Stufe mithilfe eines Beispiels initial durchgeführt wird, handelt es sich bei diesem Forschungsprojekt nach BLESSING UND CHAKRABATI um die *Erarbeitung einer Unterstützung* („*development of support*“).<sup>82</sup> Da es sich bei dem Forschungsvorhaben nach BLESSING UND CHARABATI um die *Erarbei-*

---

<sup>78</sup> Wenn im Folgenden von Ökobilanz gesprochen wird, ist die Bilanzierung der Umweltwirkung von Prozessen nach DIN EN ISO 14040 bzw. 14044 gemeint.

<sup>79</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 33ff.

<sup>80</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 34ff.

<sup>81</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 35ff.

<sup>82</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 61

tung einer Unterstützung handelt, wird die Durchführung einer initialen zweiten deskriptiven Stufe („Initial DS-II“)<sup>83</sup> zur Evaluierung vorgeschlagen. BLESSING UND CHAKRABATI empfehlen als ein geeignetes Vorgehen für die zweite deskriptive Stufe eine beispielhafte Anwendung der erarbeiteten Unterstützung und die Beantwortung von Fragen aus der Anwenderperspektive bzw. aus der Perspektive des Entwicklers der erarbeiteten Unterstützung.<sup>84</sup> In Kapitel 5 wird am Beispiel einer alternativen Verwendung von Metallverschnitt die Grundlage einer *Anwendungsevaluierung* („application evaluation“)<sup>85</sup> bereitgestellt. Anstatt einer Verwertung durch die Stahlherstellung wird in dem Beispiel Verschnitt aus der Fertigung zur Substitution von fabrikneuem Flach-erzeugnis verwendet. Es werden ökologische und ökonomische wie auch gesellschaftliche Wirkungen auf die über Materialflüsse des zu entwickelnden Produktes in Verbindung stehende Akteure des Wertschöpfungsnetzwerkes erwartet. In Kapitel 6 werden anhand der beispielhaften Anwendung sowohl eine *Anwendungsevaluierung* als auch eine *Erfolgsevaluierung* („access evaluation“)<sup>86</sup> durchgeführt.<sup>87</sup>

Bild 1-3 stellt eine schematische Kurzzusammenfassung der Arbeit dar und ordnet den vier Stufen der DRM die entsprechenden Kapiteln der Arbeit zu.

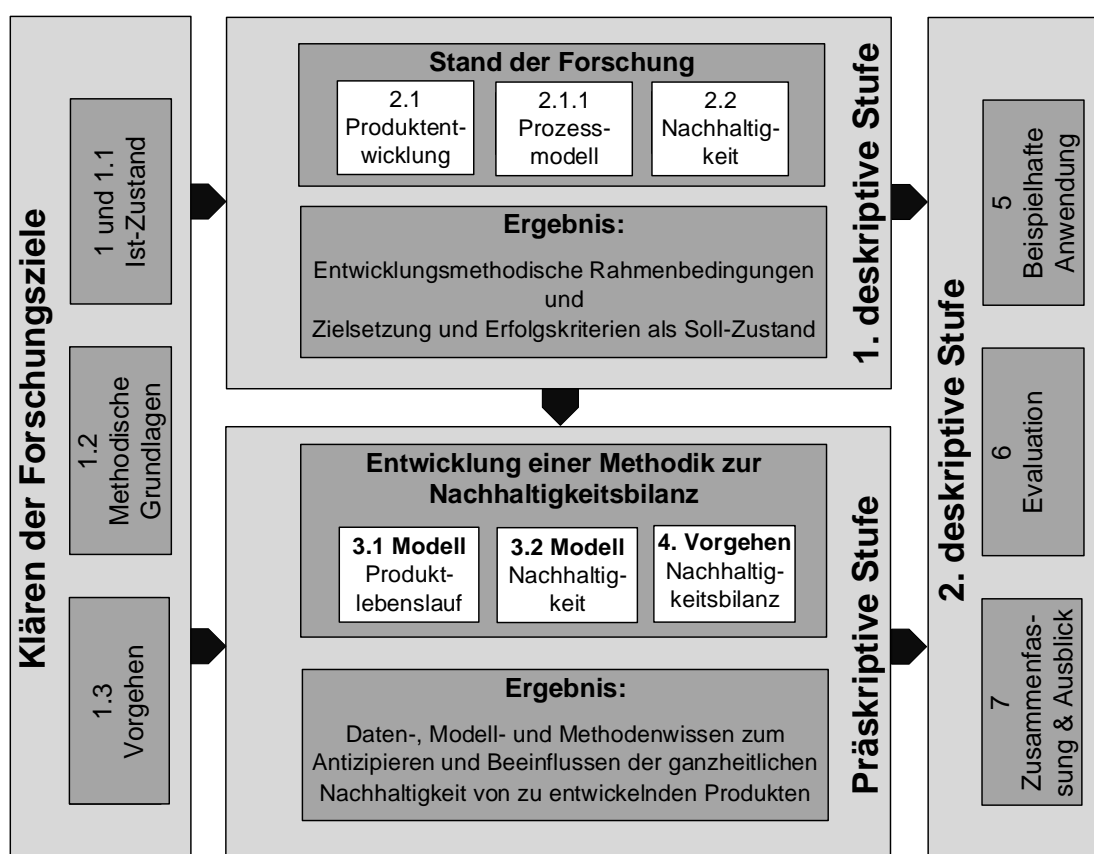


Bild 1-3: Schematische Kurzzusammenfassung der Arbeit

<sup>83</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 195

<sup>84</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 208f.

<sup>85</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 37ff.

<sup>86</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 37

<sup>87</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 185f.

## 2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird in Anlehnung an die erste deskriptive Stufe die Literatur aufbereitet. Ziel ist die Erarbeitung des Einflussbereiches der Produktentwicklung über die Aktionsparameter auf die Entwicklung nachhaltiger Produkte. Es wird der Stand der Forschung bezüglich der konstruktionsmethodischen Forschung in Kapitel 2.1 wie auch bezüglich des Verständnisses der Nachhaltigkeit in Kapitel 2.2 beleuchtet und diskutiert. In Kapitel 2.3 wird das Ergebnis in Form von Anforderungen an eine in Modellen und Vorgehen konsistente Methodik der Nachhaltigkeitsbilanzierung erarbeitet.

### 2.1 Das Partialmodell der Ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung

Das Partialmodell der *Ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung (GPPe)* ist im Rahmen des *Sonderforschungsbereiches 392: Entwicklung umweltgerechter Produkte – Methoden, Arbeitsmittel und Instrumente* entwickelt worden.<sup>88</sup> Es stellt den informatischen Zusammenhang zwischen den Teilprozessen der Produktentwicklung und denen des virtuellen<sup>89</sup> Produktlebenslaufes dar (siehe Bild 2-1).<sup>90</sup>

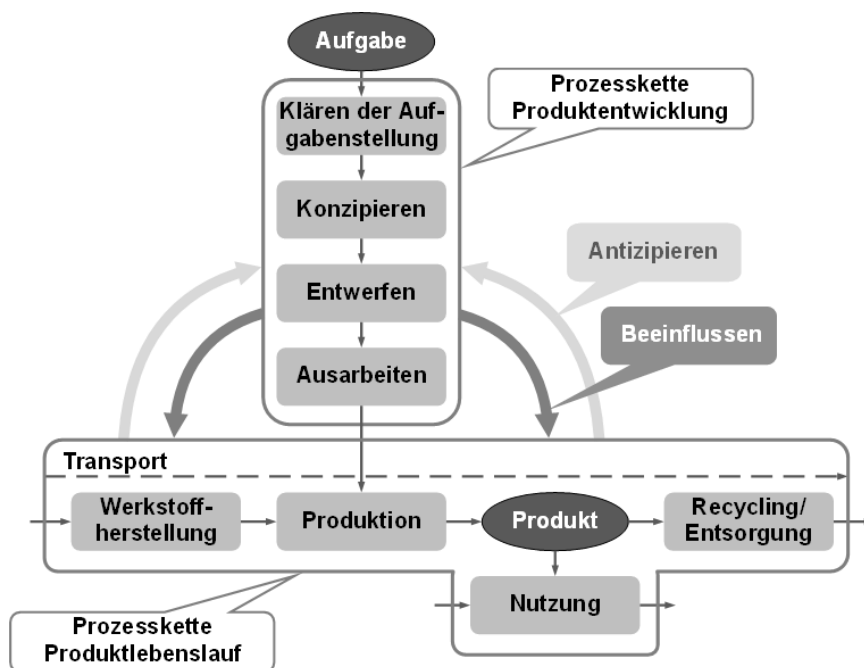


Bild 2-1: Der Informationsfluss im Partialmodell der GPPe<sup>91</sup>

Um dem Prinzip des geschlossenen Produktkreislaufes im Sinne *Von der Wiege zur Wiege (cradle-to-cradle)* gerecht zu werden, wird der Verantwortungsbereich der Pro-

<sup>88</sup> Anderl und Melk 2005, S. 3ff.

<sup>89</sup> virtuell im Sinne von nicht real stattfindend; Birkhofer et al. 2012, S. 566 definieren das Antizipieren von Prozessen über das in Betrachtziehen möglicher Prozesse und ihrer Umweltwirkungen während sämtlicher Teilprozesse des Produktlebenslaufes

<sup>90</sup> Birkhofer et al. 1998, S. 3

<sup>91</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 566

duktentwicklung von der Fertigung des zu entwickelnden Produktes zu sämtlichen Teilprozessen des Produktlebenslaufes angenommen.<sup>92</sup> Die primären „klassischen“ Ziele<sup>93</sup> der Produktentwicklung sind in der Vergangenheit „[...] eine kostensparende Herstellung, eine hochwertige Produktqualität und eine termingerechte Verfügbarkeit des Produktes für den Kunden“<sup>94</sup> gewesen. Darunter fallen auch die Kostenanforderungen der Kunden an das Produkt.<sup>95</sup> Weiterhin zählt zu den klassischen Zielen einer Produktentwicklung die Erfüllung der Arbeits-<sup>96</sup> und Produktsicherheit.<sup>97</sup> Diese klassischen Ziele bzw. die Erfüllung der klassischen Anforderungen durch das Produkt wird im Folgenden vorausgesetzt.

Entsprechend der *Aufgabe* werden in jedem Arbeitsschritt der Produktentwicklung die abhängigen Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes synthetisiert. Die Synthese der abhängigen Eigenschaften erfolgt durch die unabhängigen Werkstoff- und Geometrieigenschaften.<sup>98</sup> Die Beeinflussung dieser unabhängigen Eigenschaften basiert auf einer Analyse der Wirkung unterschiedlicher synthetisierter Ausprägungen zu den synthetisierten Merkmalen des zu entwickelnden Produktes.<sup>99</sup> Zur Entwicklung umweltgerechter Produkte werden beispielsweise mögliche Nutzungsprozesse antizipiert, entsprechende Wirkungsindikatorwerte synthetisiert<sup>100</sup> und ihre Wirkung über Wirkungsindikatoren auf die Umwelt analysiert.<sup>101</sup> Auf Grundlage der Analyse dieser Wirkung werden Entscheidungen hinsichtlich der abhängigen und unabhängigen Eigenschaften entsprechend dem Kriterium der Umweltwirkung getroffen und damit der Produktlebenslauf beeinflusst.<sup>102</sup> Als Kriterien zur Beeinflussung der Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes werden die Anforderungen herangezogen.<sup>103</sup> Mit der gewählten Datenbasis und dem gewählten Partialmodell ändern sich die Merkmale des zu entwickelnden Produktes und/oder die Ausprägungen und damit der Produktlebenslauf. Der Einflussbereich der Produktentwicklung beschränkt sich nach diesem Verständnis des Antizipierens und Beeinflussens auf von der Produktentwicklung möglichen zu treffenden Entscheidungen (Aktionsparameter, vgl. Abschnitt 1.1). Ihre Wirkung auf den Produktlebenslauf und damit auf die Nachhaltigkeit des zu entwickelnden Produktes wird während der Produktentwicklung analysiert. Die Möglichkeit des Anti-

---

<sup>92</sup> Winkler et al. 2000, S. Abschnitt 2.1/Seite 2ff.

<sup>93</sup> In Anlehnung an Niemann 2009, S. 226 werden in dieser Arbeit „[...] die klassischen Anforderungen als selbstverständliches Muss [...]“ angesehen. Unter klassischen Zielen/Anforderungen der Produktentwicklung werden sämtliche Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes verstanden, die unabhängig von dem Nachhaltigkeitsgedanken bereits zum Stand der Forschung und Technik gehören. Dazu zählen auch gesetzliche Anforderungen und Pflichten.

<sup>94</sup> Niemann 2009, S. 226

<sup>95</sup> Ishioka und Yasuda 2009, S. 1699ff.

<sup>96</sup> Pahl et al. 2007, S. 350ff.; Hubka 1976, S. 65

<sup>97</sup> Hubka 1973, S. 48

<sup>98</sup> VDI 2223, S. 12ff.

<sup>99</sup> VDI 2221, S. 3

<sup>100</sup> Entsprechend dem Modellverständnis nach Abschnitt 1.2 entspricht die Synthese der Individualisierung eines Partialmodelles zu einem Individualmodell.

<sup>101</sup> DIN EN ISO 14044, S. 37ff.

<sup>102</sup> Birkhofer et al. 1998, S. 3; Gleich 1996, S. 38 überträgt dieses Vorgehen auf eine kostengünstige Produktentwicklung.

<sup>103</sup> VDI 2221, S. 4 beschreibt diesen Prozess mit dem systemtechnischen Vorgehensmodell.

zipierens der Folgen von Entscheidungen der Produktentwicklung auf den Produktlebenslauf ist eine notwendige Voraussetzung zum Beeinflussen hinsichtlich definierter Kriterien, beispielsweise der Anforderungen. Andernfalls wird in dieser Arbeit von einer Festlegung gesprochen. Sie unterscheidet sich von dem Beeinflussen dahingehend, dass Entscheidungen nicht auf Grundlage von antizipierten Folgen derselben getroffen werden.

Zum einen ist aufgrund des Dilemmas der Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 1) die Beeinfluss- bzw. Antizipierbarkeit der Lebenslaufprozesse von dem Konkretisierungsgrad des Produktes während der Produktentwicklung und den jeweils verwendeten Produktmodellen der einzelnen Arbeitsschritte abhängig.<sup>104</sup> So werden zwischen der Produktion und der Produktentwicklung erst während des Entwurfsprozesses Informationen bezüglich des fertigungs- und montagegerechten Gestaltens sowie der Wahl geeigneter Werkstücke oder -stoffe ausgetauscht.<sup>105</sup> Während früherer Arbeitsschritte der Produktentwicklung erlauben die durch die Produktmodelle vorgegebenen beeinflussbaren Merkmale des zu entwickelnden Produktes – aufgrund von Verkürzungen – keine Beeinflussung von fertigungstechnischen oder montagegerechten Eigenschaften. Beispielsweise liegt als Ergebnis des Konzipierens das zu entwickelnde Produkt in Form einer Prinzip- bzw. Strichskizze vor.<sup>106</sup> Zum anderen ist die Beeinfluss- bzw. Antizipierbarkeit von Lebenslaufprozessen von dem organisatorischen<sup>107</sup> bzw. informatorischen Abstand zwischen der Produktentwicklung und dem Lebenslaufprozess abhängig.<sup>108</sup> Im Partialmodell der GPpe ist nach GRÜNER die organisatorische Nähe zwischen der Produktentwicklung und der Produktion im geringen informatorischen Abstand begründet, was in Bild 2-1 durch den Pfeil von der Prozesskette der Produktentwicklung hin zur Produktion symbolisiert wird.<sup>109</sup> Die Prozesse des Produktlebenslaufes mit organisatorischer Nähe und geringem informatorischen Abstand zur Produktentwicklung werden im Folgenden *produktentwicklungsnah*e Lebenslaufprozesse genannt. Sie unterscheiden sich durch die detaillierte Antizipierbarkeit von Lebenslaufprozessen im Vergleich zu den *produktentwicklungsfernen* Lebenslaufprozessen mit der organisatorischen Ferne und dem größeren informatorischen Abstand. Die produktentwicklungsfernen Lebenslaufprozesse sind beispielsweise die Werkstoffherstellung oder Nutzung. Sie sind in Bild 2-1 nicht über einen Pfeil mit der Produktentwicklung verbunden. Aus dem Grund beschränkt ROSEMANN den Grundgedanken der GPpe der Beeinfluss- und Antizipierbarkeit von Lebenslaufprozessen auf den produktentwicklungsnahen Produktionsprozess.<sup>110</sup>

---

<sup>104</sup> Joos-Sachse 2006, S. 311f.

<sup>105</sup> Andreasen et al. 1987, S. 17

<sup>106</sup> VDI 2223, S. 17; Roth 2000, S. 376

<sup>107</sup> Die Ausprägung der Organisationseinheit kann unterschiedlich sein. Die Produktentwicklung kann als Unternehmensbereich innerhalb der Organisationseinheit eines Unternehmensstandortes oder über verschiedene Standorte eines Unternehmens hinweg angegliedert sein. Bei der Produktentwicklung als externe Dienstleistung – in dem Fall gehört die Produktentwicklung nicht dem gleichen Unternehmen wie die Produktion an – wird die Organisationseinheit über das Produkt definiert.

<sup>108</sup> Sarnes und Klobardanz 2013, S. 3ff.

<sup>109</sup> Grüner 2001, S. 46

<sup>110</sup> Rosemann 2012, S. 1004

Somit ist die Qualität der Antizipier- und damit der Beeinflussbarkeit von Produktlebenslaufprozessen zum einen von dem betrachteten Teilprozess des Produktlebenslaufes und zum anderen von dem jeweiligen Teilprozess der Produktentwicklung abhängig.

### 2.1.1 Das Partialmodell der Prozesse

Sowohl der Produktlebenslauf als auch die Produktentwicklung werden als Prozesskette verstanden. Sie werden dem Modellbegriff entsprechend zweckmäßig und problemorientiert dargestellt (vgl. Abschnitt 1.2). Sie lassen sich in ihrer bekannten Darstellung bis auf die Ebene von Grundverfahren im Produktlebenslauf<sup>111</sup> und von Genomen im Produktentwicklungsprozess<sup>112</sup> herunterbrechen. Es ergeben sich unterschiedliche Partialmodelle, die sich nach der Problemstellung differenzieren. Zur Dokumentation von Prozessen stehen entsprechend unterschiedliche generische Modelle zur Darstellung und Notation zur Verfügung.<sup>113</sup> Im Prozessmanagement kommen Porter-Ketten, Wertschöpfungskettendiagramme, Flussdiagramme oder objektorientierte Modelle zum Einsatz.<sup>114</sup> Dem Projektmanagement steht mit der DIN-Reihe 69901 eine genormte Methodik zur Organisation und Dokumentation von Projekten zur Verfügung.<sup>115</sup>

Zur Darstellung ablauforientierter Prozesse wie dem Produktentwicklungsprozess werden ebenfalls partielle Prozessmodelle verwendet.<sup>116</sup> Es gibt keine einheitlichen Partialmodelle. In der GPPe ist der Produktentwicklungsprozess als reines Flussmodell dargestellt (vgl. Bild 2-1). VDI 2221 schlägt eine vereinfachte ergebnisgesteuerte Prozesskette mit der Möglichkeit von Iterationsschleifen vor.<sup>117</sup> Bei der Betrachtung der Entwicklungszeit, beispielsweise bei der *verteilten gleichzeitigen Entwicklung*, wird die Prozesszeit mit im Partialmodell berücksichtigt.<sup>118</sup>

Die Partialmodelle sowohl des Prozess- und des Projektmanagements als auch des Produktlebenslaufes stellen Prozesse abstrakt auf einer Metaebene als Blackboxen dar. Zur Synthese von Nachhaltigkeitsindikatoren und der Nachhaltigkeitsanalyse anhand antizipierter technischer Prozesse des Produktlebenslaufes während der Produktentwicklung reicht eine Modellierung von Prozessen über Blackboxen nicht aus.

---

<sup>111</sup> Blass und Hampe 1989, S. 14

<sup>112</sup> Zier 2014, S. 77ff.

<sup>113</sup> Gadatsch 2012, S. 63ff.

<sup>114</sup> Koch 2011, S. 47ff.; Bundesverwaltungsamt 2013, S. 5ff.

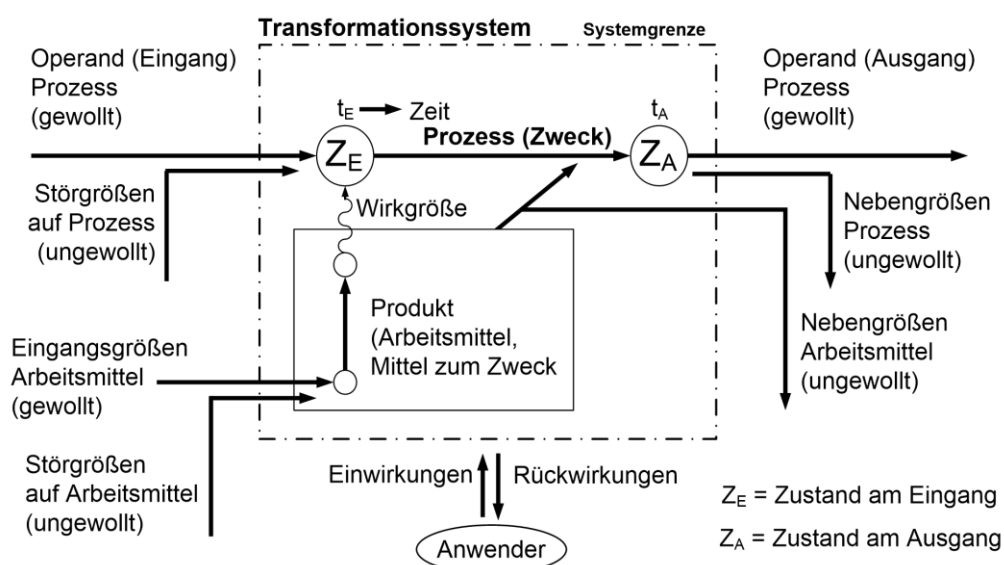
<sup>115</sup> DIN 69901 Blatt 2, S. 5

<sup>116</sup> Pahl et al. 2007, S. 769

<sup>117</sup> VDI 2221, S. 9

<sup>118</sup> Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 288f.; Winner et al. 1988, S. 12

Technische Prozesse sind mit Umweltwirkungen und Kosten verbunden bzw. verursachen diese.<sup>119</sup> Sie werden in der Nutzung beispielsweise durch die abhängigen Eigenschaften<sup>120</sup> des Produktes verursacht.<sup>121</sup> Entsprechend ist eine detailliertere Modellierung der Prozesse zur Abschätzung ihrer Wirkung auf die Nachhaltigkeit erforderlich. Zur Modellierung technischer Prozesse werden unterschiedliche Partialmodelle mit den dazugehörigen Methoden verwendet, z. B. die *Structured Analysis and Design Technique*, *Petri-Netze* oder *Netzplantechniken*.<sup>122</sup> In den Konstruktionswissenschaften, insbesondere bei Nachhaltigkeitsbetrachtungen, hat sich das Prozessmodell<sup>123</sup> nach HEIDEMANN durchgesetzt (siehe Bild 2-2).<sup>124</sup>



**Bild 2-2: Das Partialmodell eines Prozesses nach HEIDEMANN<sup>125</sup>**

Das Prozessmodell ist sowohl für die Analyse als auch die Synthese<sup>126</sup> und damit auch zum Beeinflussen und Antizipieren technischer Prozesse des Produktlebenslaufes während der Produktentwicklung geeignet. Das Transformationssystem wird über die Merkmale *Prozess*, *Verfahren*, *Arbeitsmittel* bzw. *Operator* und den verschiedenen Flüssen und Größen beschrieben.

<sup>119</sup> DIN EN ISO 14040, S. 26ff.; DIN EN ISO 14051, S. 10ff.; Grüner 2001, S. 5; Dannheim 1999, S. 11; Atik 2001, S. 3

<sup>120</sup> Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 31 benutzen den Begriff der Relationsmerkmale und definiert sie in Anlehnung an DIN 2330, S. 8 implizit über die Beschaffenheitsmerkmale „[...] von denen alle Eigenschaften eines Produkts (Funktions- und Relationsmerkmale) abhängen.“ Aus Gründen der Konsistenz zu den vorherigen Abschnitten wird hier wegen der terminologischen Analogie zwischen Relationsmerkmalen und abhängigen Eigenschaften der Terminus der abhängigen Eigenschaften verwendet.

<sup>121</sup> Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 31

<sup>122</sup> Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 22

<sup>123</sup> Das Prozessmodell nach HEIDEMANN entspricht nach Abschnitt 1.2 einem Partialmodell. Es dient zur weiteren Spezialisierung der Teilprozesse des Produktlebenslaufes nach der GPPE.

<sup>124</sup> Rath 2014, S. 28f.; Zhao 2013, S. 66

<sup>125</sup> Heidemann 2001, S. 76

<sup>126</sup> Heidemann 2001, S. 2

Unter einem technischen Prozess wird die zeitliche zweckdienliche Transformation von Materialien, Energien und/oder Signalen in Form von Informationen<sup>127</sup> als Operanden von einem Eingangszustand ( $Z_E$ ) durch eine Wirkgröße in einen Ausgangszustand ( $Z_A$ ) innerhalb eines Transformationssystemes verstanden.<sup>128</sup> Der Operator stellt durch eine Transformation von Eingangsgrößen die Wirkgrößen bereit.<sup>129</sup> Er ist ein technisches System, eine Wirkumgebung oder ein Mensch.<sup>130</sup> Eingangsgrößen sind zur zweckdienlichen Änderung eines Operanden innerhalb des Transformationssystemes<sup>131</sup> erforderlich.<sup>132</sup> Abhängig vom betrachteten Operanden sind Energien bzw. Energieträger, Hilfs- bzw. Betriebsstoffe und Informationen bzw. Signale Eingangsgrößen. Die Wirkgröße bewirkt energetisch die gewollte Transformation des Operanden und wird auch als Nutzenergie bezeichnet.<sup>133</sup> Prozesse sind eine abstrakte Beschreibung gewünschter Zustandsänderungen und werden durch Verfahren realisiert.<sup>134</sup> Die sprachliche Verknüpfung des Wirkprinzips eines Operators zur Bereitstellung der Wirkgröße mit einem Prozess erfolgt über eine verbale Formulierung.<sup>135</sup> Derselbe Prozess kann durch unterschiedliche Verfahren mit unterschiedlichen Operatoren realisiert werden.

„Ein Verfahren ist stets ein komplexes Wirkungssystem aus vielen Elementen, die untereinander und mit der Umgebung durch Stoff-, Energie-, und Informationsflüsse verbunden sind.“<sup>136</sup>

Fertigungsverfahren werden beispielsweise durch Wirksysteme bestehend aus u. a. der Kinematik von Werkzeugen, der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück oder der Beanspruchung des Werkstückes durch das Werkzeug beschrieben und über diese Merkmale systematisiert. Sowohl die benötigten Hilfs- und Betriebsstoffe oder die benötigte Energie als auch die auftretenden Stör- und Nebengrößen sind vom gewählten Verfahren und dem Operator abhängig. Neben den gewollten Ein- und Ausgangszuständen von Transformationssystemen nehmen ungewollte Stör- und Nebengrößen Einfluss auf den Prozess, das Verfahren, die Operatoren oder die Umgebung.<sup>137</sup> Unter einer Störgröße wird ein ungewollter Eingang von Material,

<sup>127</sup> Die Dreiteilung basiert auf Wiener 1975, S. 132. Völz 1999, S. 289f. diskutiert die vermeintliche Fehlinterpretation bzw. die fehlerhafte Übersetzung und die daraus resultierende fehlerhafte Auslegung der Dreiteilung.

<sup>128</sup> In Anlehnung an Ropohl 2009, S. 102f.; Hubka 1973, S. 19f.; Heidemann 2001, S. 71; Roth 2000, S. 17; während der Entwicklung eines Produktes sind die Zustände vor und nach einer Zustandsänderung weder real noch konkret. Sie sind weder beobacht- noch messbar. Es handelt sich um virtuelle Transformationssysteme, die durch die Produktentwicklung antizipiert werden.

<sup>129</sup> Heidemann 2001, S. 88

<sup>130</sup> Heidemann 2001, S. 71

<sup>131</sup> Nach Heidemann 2001, S. 145 beschreibt das Transformationssystem die „Gesamtheit [!] bestehend aus Prozess, Produkt [bzw. Operator] und Anwender, um Operanden zweckdienlich zu verändern“. Das Transformationssystem benötigt entsprechend zur Durchführung der zweckdienlichen Veränderung eines Operanden einen Prozess, der durch ein Verfahren realisiert wird, einen Operator mit entsprechenden Eingangsgrößen und einen Anwendenden.

<sup>132</sup> Heidemann 2001, S. 130; Heidemann 2001, S. 98

<sup>133</sup> Rath 2014, S. 157; Heidemann 2001, S. 86ff.

<sup>134</sup> Heidemann 2001, S. 83

<sup>135</sup> Heidemann 2001, S. 81

<sup>136</sup> VDI 2221, S. 24

<sup>137</sup> Heidemann 2001, S. 102ff.

Energie und/oder Informationen verstanden.<sup>138</sup> Nebengrößen sind verfahrensspezifische ungewollte Ausgänge von Material, Energie und/oder Informationen während der Transformation und/oder aus dem Operator. Als Nebengrößen gelten auch Abfall- bzw. Kuppelprodukte.<sup>139</sup> Der Anwender bzw. Anwendende nimmt ebenfalls Einfluss auf das Transformationssystem. Er wirkt aktiv, korrigierend oder überwachend auf das Transformationssystem ein.<sup>140</sup> Der Mensch als anwendende Person oder Operator wirkt auf das Transformationssystem ein, indem er:<sup>141</sup>

- mit oder ohne Operatoren eine Wirkgröße für die Transformation bereitstellt.
- Wirkgrößen zur Signalbetätigung bereitstellt.
- durch ungewollte Nebengrößen, z. B. seine Körperwärme, Einfluss auf den Prozess und/oder die Umgebung nimmt.

Der Aufwand des Anwendenden innerhalb des Transformationssystemes ist von der Technologie des Operators abhängig. Beispielsweise kann ein Trennprozess zur Fertigung eines Blechteiles manuell durch eine Schere oder durch eine Maschine erfolgen. Für die manuelle Fertigung stellt der Anwendende eine Kraft zur Erzeugung von Scherkräften über die Schere als Operator auf das Blech bereit. Für die maschinelle Fertigung sind Informationen in Form von Signalen durch den Anwendenden nötig.

Durch den steigenden Informationsgehalt bei der Modellierung eines Transformationssystemes vom höchsten Abstraktionsgrad *Prozess*, über das *Verfahren* zum geringsten Abstraktionsgrad, dem Verfahren in Kombination mit dem Operator, wird in dieser Arbeit auch von den drei Abstraktionsebenen des Prozessmodelles gesprochen.<sup>142</sup> Beispielsweise kann der Prozess *Trennen von Teilen aus Blech* durch die Verfahren *Scherschneiden* oder *thermisches Abtragen* realisiert werden. Der Informationsgehalt steigt durch die von dem Verfahren vorgegebene Wirkgröße. Die Operanden zur Bereitstellung der mechanischen Energie für das Scherschneiden oder der thermischen Energie für das Abtragen erhöhen den Informationsgehalt durch die Individualisierung der Größen und des nötigen Aufwandes für den Anwendenden innerhalb des Transformationssystemes. Der Einflussbereich des Produktentwickelnden erstreckt sich auf sämtliche Abstraktionsebenen. Durch die Entscheidungen über Geometrien oder Werkstoffe und -stücke des zu entwickelnden Produktes werden mögliche Fertigungsverfahren mit entsprechenden Operatoren beeinflusst. Mit dem Operator werden die nötigen Eingangs- und auch die auftretenden Neben- und Störgrößen beeinflusst. Somit trägt das Prozessmodell durch die Möglichkeit Transformationssysteme auf den drei Abstraktionsebenen zu beschreiben dem Dilemma der Produktentwicklung und

<sup>138</sup> Heidemann 2001, S. 102; Heidemann 2001, S. 145; Rodenacker 1991, S. 199ff.

<sup>139</sup> Heidemann 2001, S. 106; Heidemann 2001, S. 144; Ropohl 2009, S. 249

<sup>140</sup> Ropohl 2009, S. 77

<sup>141</sup> Heidemann 2001, S. 93

<sup>142</sup> Nach Ropohl 2009, S. 21ff. enthalten Technologien das Wissen um Operanden, Operatoren und Betriebsstoffen, um die physikalischen, chemischen und ggf. biologischen Abläufe sowie deren Zusammenhänge, entsprechend der Modellierung des Transformationssystemes. Das Verfahren beschreibt das Vorgehen bzw. den Ablauf zur zweckdienlichen Änderung eines Operanden und dient nach Sauer 2006, S. 71 zur „[...] Realisierung eines abstrakt beschriebenen Prozesses [...]“.

der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Problematik der Qualität der Beeinflussbarkeit und Antizipierbarkeit von Transformationssystemen des Produktlebenslaufes Rechnung.

### 2.1.2 Das Partialmodell des Produktlebenslaufes

Das Partialmodell des Produktlebenslaufes modelliert ablaufforientiert einen Teil der (künstlichen) virtuellen Technosphäre,<sup>143</sup> auch als Transformatorensphäre bezeichnet,<sup>144</sup> welche die Produktentwicklung beeinflusst.<sup>145</sup> Die Technosphäre umfasst alle anthropogenen Aktivitäten, die technischen Prozessen entsprechen. Das Partialmodell des Produktlebenslaufes unterteilt das Leben eines virtuellen Produktes während der Produktentwicklung in unterschiedliche Teilprozesse.<sup>146</sup> Der Lebenslauf wird während der Produktentwicklung durch Individualisierung des Partialmodelles stetig konkretisiert und spezialisiert und ändert sich mit der Variation der unabhängigen Eigenschaften.<sup>147</sup> Der Produktlebenslauf dient über die Individualisierung durch antizipierte Prozesse als Grundlage zum Antizipieren und Beeinflussen der Wirkung des zu entwickelnden Produktes auf die Nachhaltigkeit.

Das Partialmodell des Produktlebenslaufes ist vom Produktlebenszyklus und dem Produktentstehungsprozess zu unterscheiden. Der Produktlebenszyklus unterteilt das Leben eines Produktes anhand des Verlaufes von Nominalgüterbilanzen, er spiegelt eine betriebswirtschaftliche Sicht wider.<sup>148</sup> Der Lebenszyklus wird in einen Entstehungszyklus und einen Marktzyklus unterteilt.<sup>149</sup> ISO 15226 benutzt den Produktlebenszyklus als Organisationsschema zur „[...] effiziente[n] und transparente[n] Handhabung von technischen Dokumenten [...]“<sup>150</sup> Der Produktentstehungsprozess ordnet die Konstruktion und Entwicklung in einen zeitlichen Zusammenhang mit dem realen Produktlebenslauf bis zur Nutzung ein und verknüpft diesen mit dem vorhandenen Informationsfluss zwischen den Unternehmensbereichen und den Kunden.<sup>151</sup>

In der Literatur sind unterschiedliche Partialmodelle des Produktlebenslaufes zu finden.<sup>152</sup> Sie unterscheiden sich nicht nur in der Nomenklatur und der Granulierung der einzelnen Teilprozesse, sondern auch in dem Verständnis der Materialflüsse und der Abbildung und Nomenklatur von Kreisläufen. Zur Vermeidung der Beseitigung durch

<sup>143</sup> Zum Begriff *Technosphäre* siehe: Hubka 1973, S. 27f.; Prammer 2009, S. 44ff.; Hofstetter 1998, S. xviii; Hofstetter 1998, S. 33ff.; Liesegang 1993, S. 386f.; Schmidt-Bleek und Klütting 1993, S. 123; Vezzoli und Manzini 2008, S. 257

<sup>144</sup> Sterr 2003, S. 29ff.

<sup>145</sup> Thommen und Achleitner 2012, S. 55 sprechen in dem Zusammenhang von der Lebenszyklusverantwortung, was ihrem Verständnis des Produktlebenszyklus widerspricht; Thommen und Achleitner 2012, S. 182ff..

<sup>146</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 564; Westkämper 2013, S. 13; Hanusch 2011, S. 79

<sup>147</sup> Jede Eigenschaft des zu entwickelnden Produktes, bestehend aus einem Merkmal mit einer Ausprägung, gehört zu einer theoretisch möglichen Lösung der Entwicklungsaufgabe, die durch die Anforderungen begrenzt ist. Somit führen unterschiedliche Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes zu unterschiedlichen antizipierten Produktlebensläufen.

<sup>148</sup> Vernon 1966, S. 198ff.; Hirsch 1967, S. 38ff.; Thommen und Achleitner 2012, S. 182ff.; Pahl et al. 2005, S. 92

<sup>149</sup> Pfeiffer und Bischof 1974, S. 637

<sup>150</sup> DIN ISO 15226, S. 4

<sup>151</sup> Pahl et al. 2007, S. 7

<sup>152</sup> u. a. Grüner 2001, S. 45; Walther 2010, S. 23; Birkhofer et al. 2012, S. 564; Schneider 1992, S. 51; Meyer 1983, S. 13; Pahl et al. 2007, S. 3

Deponielagerung werden Materialien innerhalb des Produktlebenslaufes einem Kreislauf zugeführt. Im Vergleich zur Herstellung von Werkstoffen aus Rohstoffen ergeben sich Energieersparnispotenziale durch eine Kreislaufführung von Materialien, bei Stahlwerkstoffen beispielsweise über 50%.<sup>153</sup> Besonderes Augenmerk bei der Betrachtung der Produktlebensläufe wird auf die Kreislaufwirtschaft als (vermeintlich) wichtigste Maßnahme des Erreichens eines nachhaltigen Zustandes gelegt.<sup>154</sup> Bei der Betrachtung der Kreislaufprozesse unterscheiden sich die in der Literatur veröffentlichten Produktlebensläufe signifikant. Im Folgenden wird beispielhaft auf die Produktlebensläufe nach der GPPe und MEYER eingegangen.

Der Produktlebenslauf nach der GPPe wird produktspezifisch in Prozesse der *Werkstoffherstellung*, der *Produktion*, der *Nutzung* und des *Recyclings / der Entsorgung* unterteilt (vgl. Bild 2-3).

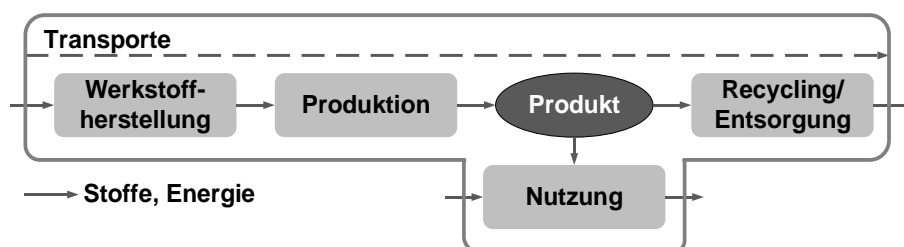


Bild 2-3: Der Produktlebenslauf nach GPPe<sup>155</sup>

Im Mittelpunkt der Betrachtung steht das zu entwickelnde Produkt mit den Energien und Stoffen, die während des Produktlebenslaufes transformiert werden. Die Darstellung der Zustände erfolgt über Pfeile.<sup>156</sup> Den Prozessen des Produktlebens sind Transportprozesse parallel geschaltet, die durch eine gestrichelte Pfeillinie visualisiert werden.

Der Einsatz als Teilprozess der Nutzung<sup>157</sup> hat die Sonderstellung inne, da

„[...] nicht das Produkt bzw. seine Komponenten und Bauteile be- oder verarbeitet [werden], sondern das Produkt selbst wird zur Be- oder Verarbeitung von Stoffen, Energien oder Signalen genutzt.“<sup>158</sup>

Der Einsatz ist dadurch gekennzeichnet, dass die Energie- und Materialflüsse ausschließlich durch das Nutzerverhalten beeinflusst werden und nicht mehr im unmittelbaren Beeinflussungsbereich der Produktentwicklung liegen. Daher wird im Folgenden auch die Unterscheidung zwischen den Fabrikationsprozessen und der Nutzung, insb.

<sup>153</sup> Wens et al. 2011, S. 53; Martens 2011, S. 2ff.; Gruden 2008, S. 314 f

<sup>154</sup> u. a. Liesegang 1993, S. 386f.; VDI 2243, S. 8f.; Hirth et al. 2001, S. 2.2ff.; von Hauff und Kleine 2009, S. 35; Nasr und Thurston 2006, S. 17; Dyckhoff und Souren 2008, S. 178ff.

<sup>155</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 564

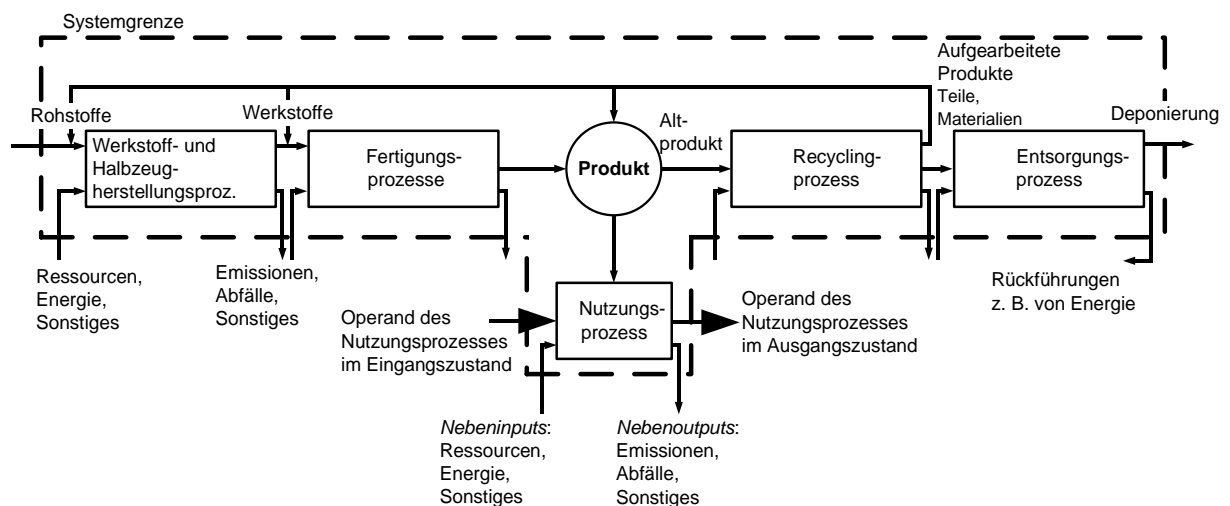
<sup>156</sup> Wenn die Kästen Teilprozesse des Produktlebenslaufes darstellen und die Transportprozesse separat abgebildet werden, dann entsprechen die Pfeile nach Abschnitt 2.1.1 Zuständen, die im Prozessmodell nach Heidemann entsprechend Bild 2-2 durch Kreise modelliert sind.

<sup>157</sup> Dannheim 1999, S. 45ff.

<sup>158</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 564

dem Einsatz, getroffen. Die Systemgrenze auf der Seite des Einganges zur Werkstoffherstellung trennt den Lebenslauf des Produktes von der natürlichen Umwelt<sup>159, 160</sup>. Durchlaufen die Stoffe oder Energien „[...] das Recycling oder die abschließende Entsorgung [...]“<sup>161</sup> verlassen sie die Systemgrenze des Produktlebenslaufes.<sup>162</sup>

GRÜNER hat den Produktlebenslauf der GPPe konkretisiert und detaillierter dargestellt (vgl. Bild 2-4). Zusätzlich zu den Neben-Inputs und -Outputs (analog zu den Neben-Größen nach Abschnitt 2.1.1) werden das Recycling und die Entsorgung getrennt betrachtet. Die zur Deponierung vorgesehenen Abfälle verlassen den Produktlebenslauf. Materialien, die während der Kreislaufprozesse aufgearbeitet worden sind, werden als Altprodukte, Werkstoffe oder Rohstoffe den dazugehörigen Teilprozessen desselben Produktlebenslaufes rückgeführt.<sup>163</sup> Somit werden Kreislaufprozesse in dem Modell mit den Aufarbeitungs- und Aufbereitungsprozessen gleichgesetzt.<sup>164</sup>



**Bild 2-4: Der detaillierte Produktlebenslauf der GPPe nach GRÜNER<sup>165</sup>**

<sup>159</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 564 verwenden ursprünglich den Terminus der Geosphäre zur Abgrenzung des Produktlebenslaufes von der natürlichen Umwelt. Aus Gründen der terminologischen Konsistenz mit der Ökobilanz und den nachfolgenden Absätzen wird hier der Terminus der natürlichen Umwelt bevorzugt; siehe hierzu auch Fn. 255 und 256.

<sup>160</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 564

<sup>161</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 565

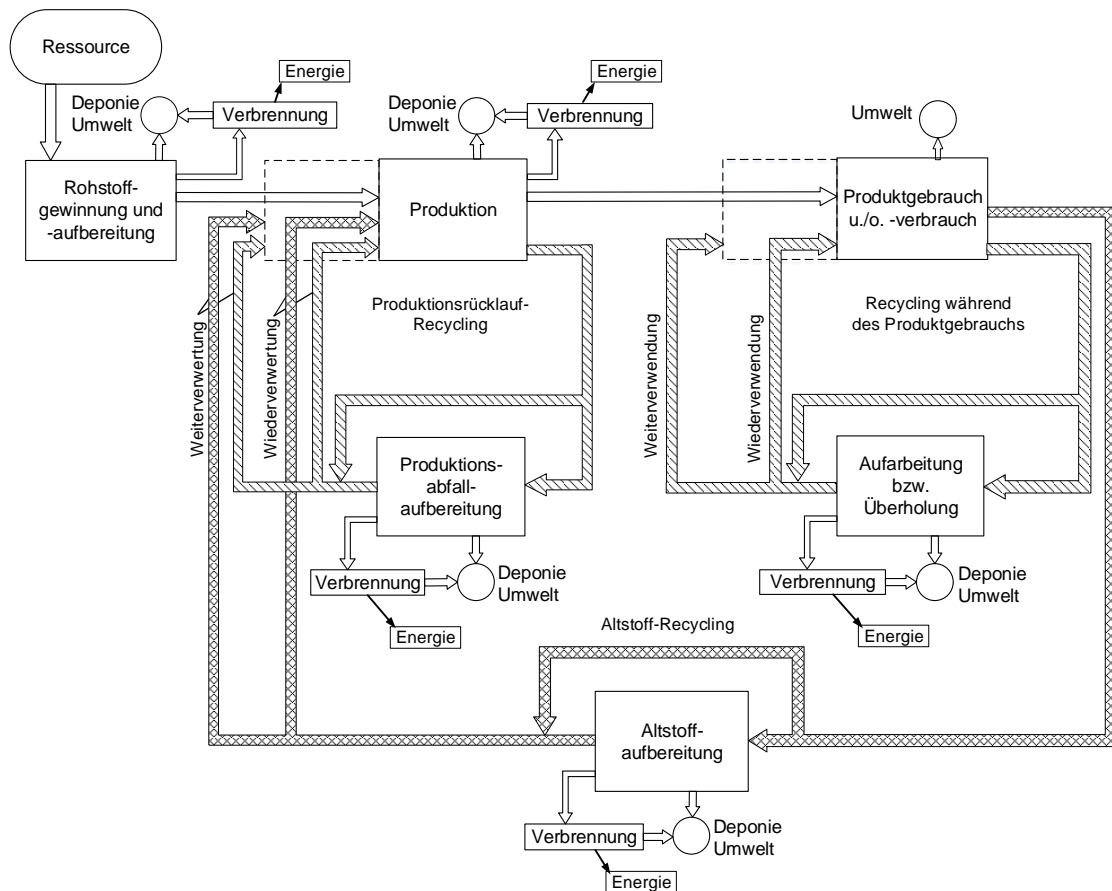
<sup>162</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 565

<sup>163</sup> Grüner 2001, S. 45

<sup>164</sup> Zum Verständnis der Aufarbeitungs- und Aufbereitungsprozesse siehe VDI 2243, S. 35

<sup>165</sup> Grüner 2001, S. 45

In Hinblick auf die Kreislaufprozesse stellt MEYER ein detailliertes Partialmodell des Produktlebenslaufes zur Verfügung (vgl. Bild 2-5).



**Bild 2-5: Der Produktlebenslauf nach MEYER<sup>166</sup>**

Der Produktlebenslauf wird in die Teilprozesse der *Rohstoffgewinnung und -aufarbeitung*, der *Produktion* und des *Produktgebrauches u./o. -verbrauches* aufgeteilt und beschränkt sich nicht auf ein Produkt. Die Systemgrenze trennt den Produktlebenslauf von der natürlichen Umwelt<sup>167</sup> ab.<sup>168</sup> Technisch bzw. wirtschaftlich nicht verwendbare bzw. verwertbare Stoffe werden über eine Verbrennung oder eine Deponie als „Stofffluß [!] der Verluste“<sup>169</sup> an die natürliche Umwelt abgegeben.<sup>170</sup> Bei den Recyclingprozessen werden das *Produktionsrücklauf-Recycling*, das *Altstoffrecycling* und das *Recycling während des Produktgebrauchs* unterschieden, die als Kreislaufarten bezeichnet werden.<sup>171</sup> Die Differenzierung der Kreislaufarten erfolgt über die Ursprungs- und Zielprozesse des zu recycelnden Stoffe innerhalb des Produktlebenslaufes. An diese Kreislaufarten sind optionale Behandlungsprozesse wie die Aufbereitung

<sup>166</sup> VDI 2243 Blatt 1, S. 4 in Anlehnung an Meyer 1983, S. 13

<sup>167</sup> Meyer 1983, S. 11 benutzt ursprünglich die Biosphäre als Abgrenzung des Produktlebenslaufes von der natürlichen Umwelt. Analog zu Fn. 159 wird der Terminus der natürlichen Umwelt bevorzugt.

<sup>168</sup> Meyer 1983, S. 11

<sup>169</sup> Meyer 1983, S. 13

<sup>170</sup> Meyer 1983, S. 13

<sup>171</sup> Meyer 1983, S. 10f.

oder die Aufarbeitung geknüpft.<sup>172</sup> Zudem erfolgt eine weitere Unterteilung von Kreislauffläüssen in die sogenannten Recyclingformen der *Wieder-* und *Weiterverwendung* bzw. der *Wieder-* und *Weiterverwertung*. Die Differenzierung der Recyclingformen erfolgt über die Ursprungs- und Zielprozesse des zu recycelnden Stoffes innerhalb des Produktlebenslaufes und den Zweck der innerhalb jedes Teilprozesses vollzogenen Transformation des jeweils betrachteten Stoffes.<sup>173</sup> Die Verwertung wird mit einem Leiten von Stoffen in die Produktion gleichgesetzt.<sup>174</sup> Eine Verwendung entspricht dem Leiten von Stoffen in den Ge- bzw. Verbrauch ohne die Gestalt des Stoffes zu ändern.<sup>175</sup>

Die aufgezeigten Produktlebensläufe weisen sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede auf. Die gezogene Systemgrenze trennt bei den hier aufgezeigten Beispielen den Produktlebenslauf von der natürlichen Umwelt. Die Unterschiede sind in der Modellbildung der Lebensläufe zu finden. MEYER modelliert den Produktlebenslauf produktunspezifisch, was durch die Möglichkeit einer Weiterverwendung bzw. -verwertung verdeutlicht wird. Die GPPe beschränkt sich auf die Modellierung des Lebenslaufes eines bestimmten Produktes. Dadurch werden Wechselwirkungen zu parallel laufenden Produktlebensläufen nicht berücksichtigt. Entsprechend ist es der Produktentwicklung nicht möglich eine Weiterverwertung bzw. -verwendung zu antizipieren. Zudem herrschen zum Teil Inkonsistenzen innerhalb der Modelle. Die GPPe weist den Teilprozessen des Produktlebenslaufes spezifische Materialien zu. Rohstoffe beispielsweise werden in die Werkstoffherstellung geleitet. Sie werden der Umwelt entnommen oder nach Recyclingprozessen zurückgeführt. Das Nomen Rohstoff ist ein Kompositum aus dem Adjektiv roh und dem Nomen Stoff. Das Adjektiv roh deutet im technischen Kontext darauf hin, dass der Stoff nicht be- oder verarbeitet worden ist.<sup>176</sup> Nach DIN 8580 ist ein Stoff formlos.<sup>177</sup> Somit handelt es sich bei einem Rohstoff um einen (formlosen) Stoff,<sup>178</sup> der noch keine Be- oder Verarbeitung (durch den Menschen) erfahren hat.<sup>179</sup> Entsprechend widerspricht die Bezeichnung Rohstoff für Recyclate dem allgemeinen Verständnis.<sup>180</sup> Zudem herrschen Inkonsistenzen bezüglich der Aufteilung der Teilprozesse. Die Werkstoffe und Halbzeuge werden nach Bild 2-4 durch Prozesse der Herstellung erzeugt. Halbzeuge sind Erzeugnisse,

[...] die durch Stranggießen und gegebenenfalls anschließendes Walzen, Schmieden oder Längsteilen, durch Druckgießen, durch Walzen oder Schmie-

<sup>172</sup> Meyer 1983, S. 12

<sup>173</sup> Meyer 1983, S. 15ff.

<sup>174</sup> Meyer 1983, S. 15f.

<sup>175</sup> Meyer 1983, S. 16f.

<sup>176</sup> Bibliographisches Institut GmbH 2014e

<sup>177</sup> DIN 8580, S. 4

<sup>178</sup> Kesselring 1954, S. 169

<sup>179</sup> Wellmer 2005, S. 176ff.; Bibliographisches Institut GmbH 2014e; Birkhofer et al. 2012; VDI 4800 Blatt 1, S. 5 versteht unter einem Stoff aus der Natur einen Primärrohstoff

<sup>180</sup> Das in dieser Arbeit zugrunde gelegte Verständnis von Rohstoffen widerspricht der Definition nach DIN EN ISO 14040, S. 9, die unter einem Rohstoff ein „primäres oder sekundäres Material, das zur Herstellung eines Produktes verwendet wird“, versteht. Sekundäres Material wird in dieser Arbeit nach DIN EN ISO 14021, S. 31ff. als Recyclat bezeichnet.

den oder Längsteilen zu Blöcken oder Brammen entstanden und im Allgemeinen für die Umformung zu Flach- oder Langerzeugnissen durch Warmwalzen, durch Warmschmieden oder für die Herstellung warmgeformter Schmiedestücke bestimmt sind.“<sup>181</sup>

Nach DIN 8580 wird das Strang- bzw. Druckgießen als erster Prozessschritt der Fertigung zugeordnet.<sup>182</sup>

MEYER betrachtet wiederum unabhängig von den Teilprozessen des Produktlebenslaufes Flüsse von (formlosen) Stoffen. Gleichzeitig wird die Verwendung bzw. Verwertung über die Gestaltänderung während der Prozesse differenziert.

Für ein konsistentes Verständnis der Nachhaltigkeit des zu entwickelnden Produktes ist ein in sich konsistentes Verständnis des Produktlebenslaufes Voraussetzung. Die in diesem Abschnitt beispielhaft betrachteten Modelle des Produktlebenslaufes zeigen Inkonsistenzen, sowohl in der verwendeten Terminologie als auch in der Abgrenzung der Teilprozesse. Letzterer Sachverhalt wird insbesondere durch die mit der DIN 8580 inkonsistente Abgrenzung zwischen der Werkstoffherstellung und der dort eindeutig definierten Fertigung und dem Verständnis der Kreislaufprozesse deutlich. Die Kreislaufprozesse als eine Maßnahme zur Umsetzung nachhaltiger Produkte sind nicht konsistent und terminologisch eindeutig durchdrungen.<sup>183</sup>

Ein Grund für die herrschenden Inkonsistenzen des Produktlebenslaufes sind in der geschichtlichen Entwicklung desselben zu finden. HUBKA hat 1976 den Produktlebenslauf in Verbindung mit der Produktentwicklung gebracht.<sup>184</sup> Trotz unterschiedlicher Paradigmenwechsel und vor allem auf Grund des steigenden Nachhaltigkeitsbewusstseins hat sich das Verständnis des Produktlebenslaufes, bis auf die Umbenennung von Teilprozessen und Materialflüssen, seitdem nicht verändert. Bei einer Anpassung von Modellen sind die Modellmerkmale nach Abschnitt 1.2 zu beachten. In dem Fall wird der geschichtliche bzw. gesellschaftliche Hintergrund der 70er Jahre herangezogen. Forschungsergebnisse sind damals unter anderen gesellschaftlichen Randbedingungen erarbeitet worden. Erst nach der Ölkrise 1973 und dem langsam aufkeimenden Bewusstsein endlicher Rohstoffe mit der Veröffentlichung der Studie *The Limits to Growth* im Auftrag des *Club of Rome* 1972 hat die Nachhaltigkeitsdiskussion ihren Anfang genommen. Der Kreislaufgedanke ist als Anforderung der Entwicklung des Produktlebenslaufes zu Zeiten Hubkas nicht im Bewusstsein der Wissenschaft gewesen. Eine Anpassung von Partialmodellen damaliger Zeit auf heutige Anforderungen durch eine reine Umbenennung, beispielsweise des letzten Teilprozesses *Liquidation*<sup>185</sup> des Produktlebenslaufes nach HUBKA in *Recycling/Entsorgung* hin zum Produktlebenslauf nach der GPPe, führt zu Inkonsistenzen zwischen den ursprünglichen und dem durch

---

<sup>181</sup> DIN 199-1, S. 12

<sup>182</sup> DIN 8580, S. 8, ab Abschnitt 3 wird zwischen der Herstellung und der Fertigung unterschieden.

<sup>183</sup> Corić et al. 2013, S. 1ff. konkretisieren die in der Literatur herrschenden Diskrepanzen im Verständnis der Recyclingformen und ihrem formalen und terminologischen Verständnis.

<sup>184</sup> Hubka 1976, S. 4

<sup>185</sup> Hubka 1976, S. 4

die Umbenennung geänderten Modellmerkmalen. HUBKA versteht die Liquidation als Transformation eines Materials zu Abfall<sup>186</sup>, das Recycling wird hingegen i. d. R. als Rückgewinnung von Material fern vom Abfallbegriff verstanden.

### 2.1.3 Das Partialmodell der Produktentwicklung

Die Produktentwicklung individualisiert einen gegebenen Anfangszustand in Form einer Entwicklungsaufgabe über Zwischenzustände in den Ausgangszustand in Form der Produktdokumentation.<sup>187</sup> Die Produktentwicklung als Team aus Individuen wirkt als Operator zur Synthese von Informationen.<sup>188</sup> In der Konstruktionsmethodik finden unterschiedliche Modellierungen für den Produktentwicklungsprozess mit entsprechenden Arbeitsschritten ihre Anwendung.<sup>189</sup> Eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Prozessschritte zur Entwicklung technischer Produkte ist bei ROTH zu finden.<sup>190</sup> Sämtliche Produktentwicklungsmethodiken basieren auf dem Grundprinzip *Vom Abstrakten zum Konkreten* bzw. *Vom abstrakten Qualitativen zum konkreten Quantitativen*.<sup>191</sup> Dabei dient die Durchführung einzelner Methoden zur Konkretisierung des zu entwickelnden Produktes, was zu einem Informationszuwachs führt (vgl. Abschnitt 1.2). Das methodische Vorgehen zur Entwicklung technischer Systeme erfolgt im Einklang mit dem Dilemma der Produktentwicklung. Im Folgenden werden durch die Produktentwicklung vorgegebene Rahmenbedingungen und damit die möglichen Aktionsparameter einer Entwicklung nachhaltiger Produkte erarbeitet. Sie werden zunächst allgemein und von der Nachhaltigkeitsbetrachtung unabhängig diskutiert.

Der Produktentwicklungsprozess wird nach dem Partialmodell der GPPe in die Teilprozesse *Klären der Aufgabenstellung*, *Konzipieren*, *Entwerfen* und *Ausarbeiten* unterteilt (vgl. Bild 2-1).<sup>192</sup> Je nach Teilprozess werden durch die Modellierung des zu entwickelnden Produktes auf unterschiedlichen Konkretisierungsebenen unterschiedliche Verkürzungsmerkmale vorausgesetzt.

„Ein Produkt(darstellendes) Modell (kurz Produktmodell genannt) ist ein Modell des zu konstruierenden technischen Gebildes, das eine hinreichende und für Operationen geeignete Abbildung mindestens derjenigen (System)-Eigenschaften des Gebildes erlaubt, die im jeweiligen Phasenabschnitt [bzw. Teilprozess der Produktentwicklung] behandelt werden.“<sup>193</sup>

Die Teilprozesse werden in Arbeitsschritte gegliedert.<sup>194</sup> Jedem Teilprozess der Produktentwicklung werden unterschiedliche generische Modelle nach Abschnitt 1.1 zugewiesen, in Tabelle 2-1 *Modellarten* genannt. Sie werden ihrerseits durch unter-

<sup>186</sup> Hubka 1984, S. 165

<sup>187</sup> Heidemann 2001, S. 23

<sup>188</sup> Hubka 1976, S. 41ff.; Zier 2014, S. 66ff.

<sup>189</sup> VDI 2221, S. 9; Pahl et al. 2007, S. 198; Roth 2000, S. 376

<sup>190</sup> Roth 2000, S. 43

<sup>191</sup> Pahl et al. 2007, S. 70f.; VDI 2221, S. 3

<sup>192</sup> Pahl et al. 2007, S. 195

<sup>193</sup> Roth 2000, S. 54f.

<sup>194</sup> Pahl et al. 2007, S. 214ff.

schiedliche Partialmodelle nach Abschnitt 1.1, in Tabelle 2-1 in der Spalte *Produktmodell-darstellung* zu finden, spezialisiert und den Arbeitsschritten zugewiesen.<sup>195</sup> Der Konkretisierungsgrad des zu entwickelnden Produktes steigt entsprechend dem Dilemma der Produktentwicklung mit den Teilprozessen an.<sup>196</sup>

**Tabelle 2-1: Gegenüberstellung des Produktentwicklungsprozesses und der Produktmodelle<sup>197</sup>**

Teilpro- zesse <sup>198</sup>	Arbeitsschritte	Modelle		Produktkonkreti- sierungsebene <sup>199</sup>
		Arten	Produktmodell- darstellung	
Klären der Aufgaben- stellung	Klären und präzisieren der Aufgabenstellung	Sprach- modell	Verbale Formulie- rung	Anforderungen
Konzipie- ren	Ermittlung von Funktio- nen und deren Struktur	Gestalt-, Funktio- ns- und Sprach- modelle	Funktions- Symbole	Funktionale Ebene
	Suche nach Effekt-Lö- sungsprinzipien		Effekt, Effekt- Symbole	Prinzipielle physik- alische Ebene
	Suche nach Gestalt-Lö- sungsprinzipien		Prinzipiskizzen	
Entwerfen	Gliedern in realisierbare Module	Gestalt- modell	Module	Gestalterische und stoffliche Ebene
	Gestalten der maßge- benden Module		Funktionseinheit Funktionsteile	
	Gestalten des gesam- ten Produktes		Gesamtentwurf	
Ausarbei- ten	Festlegen der Ausführ- ungs- und Nutzungs- angaben		Einzelteildarstel- lung	Fertigungs- und montagetechnische Ebene

Nach PAHL ET AL. besteht

„die wesentliche Tätigkeit bei der Produktentwicklung und beim Lösen von Auf-  
gaben [...] in einem Vorgang der Analyse und in einem anschließenden Vor-  
gang der Synthese und läuft in Arbeits- und Entscheidungsschritten ab.“<sup>200</sup>

Das Partialmodell des Produktentwicklungsprozesses beschreibt demnach nicht nur ein allgemeines Vorgehensmodell mit Arbeitsschritten zur Entwicklung technischer Produkte, sondern auch die Beeinflussungsmöglichkeiten der Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes durch die hierarchisch determinierenden Beziehungen.<sup>201</sup>

<sup>195</sup> In der Praxis ist eine strikte Zuweisung der Partialmodelle bzw. Produktkonkretisierungsebenen zu den Arbeitsschritten der Produktentwicklung entsprechend Tabelle 2-1 nicht möglich, was durch das Gestaltmodell verdeutlicht wird. Mit dem Konkretisierungsgrad der Anforderungen steigt auch der Konkretisierungsgrad der Konzeptvarianten. Nach Pahl et al. 2007, S. 266 und VDI 2235, S. 5 ist eine über das jeweilige Produktmodell hinausgehende Konkretisierung zur Bewertung von Konzeptvarianten nötig.

<sup>196</sup> Roth 2000, S. 34

<sup>197</sup> Roth 2000, S. 376; Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 157

<sup>198</sup> Nach Bild 2-1, Teilprozesse in Anlehnung an Pahl et al. 2007, S. 195

<sup>199</sup> Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 39ff.

<sup>200</sup> Pahl et al. 2007, S. 189; sinngleich in VDI 2221, S. 4f.

<sup>201</sup> Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 40; Ponn und Lindemann 2008, S. 121; Ponn und Lindemann 2011, S. 133; Pahl et al. 2007, S. 192

Die Produktentwicklung hat abhängig von dem jeweiligen Arbeitsschritt und den zugewiesenen Partialmodellen auf verschiedene Teilprozesse des Produktlebenslaufes über die Individualisierung der partialen zu den individuellen Produktmodellen Einfluss.<sup>202</sup> Im Folgenden wird näher auf die Arbeitsschritte und die partialen Produktmodelle der Produktentwicklung eingegangen. Es werden die Grundlagen für die in Abschnitt 2.2.2 diskutierte Beeinflussbarkeit und Antizipierbarkeit von Nachhaltigkeitsaspekten während der Produktentwicklung erarbeitet.

Das Ergebnis von **Klären der Aufgabenstellung** ist die Anforderungsliste.<sup>203</sup> Sie bildet den höchsten Abstraktionsgrad der Modellierung des Produktes durch verbal formulierte Anforderungen ab (vgl. Tabelle 2-1). Sie werden beispielsweise durch die Analyse von Prozessmodellen zur Abbildung des Produktes während des Einsatzes synthetisiert (vgl. Abschnitt 1 und 2.1.1). Die Anforderungen begrenzen den Lösungsraum von allen nur erdenklichen Lösungen der Entwicklungsaufgabe auf die die Anforderungen erfüllenden theoretisch möglichen Lösungen.<sup>204</sup>

Das **Konzipieren** hat zur Aufgabe, eine qualitative und funktionsfähige prinzipielle Lösung<sup>205</sup> bzw. im Folgenden ein qualitatives und funktionsfähiges Konzept<sup>206</sup> oder nur Konzept genannt, zu entwickeln. Konzepte werden beispielsweise durch das Partialmodell der Strichskizze individualisiert.<sup>207</sup> Der Teilprozess des Konzipierens setzt sich aus einer funktionellen und einer prinzipiellen Phase zusammen (vgl. Tabelle 2-1).<sup>208</sup> Durch den Fokus auf der Produktfunktion während des Konzipierens steht der Einsatz im Vordergrund. Zunächst erfolgt eine abstrakte Beschreibung der technischen Funktion des Produktes, ohne Berücksichtigung der physikalischen oder der geometrisch-stofflichen Realisierbarkeit.<sup>209</sup> Über die Methode *Funktionsstruktur* wird die Gesamtfunktion in Teilfunktionen aufgegliedert.<sup>210</sup> Das generische Modell zu der Funktionsstruktur schlägt eine Individualisierung eines Produktes durch die allgemeinen Funktionen *Speichern, Leiten, Umformen, Wandeln* und *Verknüpfen* von Stoffen, Energien und/oder Informationen vor.<sup>211</sup> Eine Quantifizierung der Stoff- und Energiemengen ist

---

<sup>202</sup> Anzumerken ist, dass VDI 2221, S. 25f. bis auf die Entwicklung verfahrenstechnischer Produktionsanlagen eine prozessuale Betrachtung nicht vorsieht. Heidemann 2001, S. 113ff. schlägt die Anwendung des Prozessmodelles zur Synthese von Anforderungen während des Klärens der Aufgabenstellung und als Hilfsmittel für die Verfahrensentwicklung während des Konzipierens ausschließlich für den Einsatz vor.

<sup>203</sup> VDI 2221, S. 9; Roth 2000, S. 25f.

<sup>204</sup> Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 39ff. symbolisieren den Zusammenhang zwischen Anforderungen und der Begrenzung theoretisch möglicher Lösungen durch eine Kante der Grundfläche der Produktmodellpyramide. Auf dieser Kante befindet sich die beste Lösung, die durch den Produktentwicklungsprozess erarbeitet werden sollte.

<sup>205</sup> VDI 2223, S. 16; Pahl et al. 2007, S. 232

<sup>206</sup> Pahl et al. 2007, S. 232; Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 256

<sup>207</sup> VDI 2223, S. 17

<sup>208</sup> Roth 2000, S. 42; Pahl et al. 2007, S. 231ff.; VDI 2222 Blatt 1, S. 19f.

<sup>209</sup> Roth 2000, S. 26; Pahl et al. 2007, S. 256

<sup>210</sup> Pahl et al. 2007, S. 243ff.; Roth 2000, S. 26

<sup>211</sup> Roth 2000, S. 84f.; VDI 2222 Blatt 1, S. 16f.

auf Grundlage der allgemeinen Funktionen nicht möglich. Danach werden den Teilfunktionen Wirkprinzipien über physikalische Effekte zugewiesen.<sup>212</sup> Die Konkretisierung eines funktionsneutralen physikalischen Effektes zu einem Wirkprinzip<sup>213</sup> erfolgt über die Entscheidung über geometrische und stoffliche Merkmale und deren Werte als unabhängige Eigenschaften.<sup>214</sup> Den Zusammenhang zwischen der funktionsbeschreibenden Wirkgröße und den unabhängigen Eigenschaften Geometrie und Stoff bildet das Partialmodell des jeweiligen physikalischen Effektes. Beispielsweise sind die intensiven Eigenschaften von Stoffen, z. B. die Dichte, die spezifische Wärmekapazität oder die elektrische Leitfähigkeit,<sup>215</sup> stoffmengenunabhängig bzw. mengenspezifisch. Sie beschreiben in Verbindung mit der Geometrie extensive Eigenschaften von Gegenständen wie die Masse, die Wärmekapazität oder den elektrischen Widerstand.<sup>216</sup> Durch die Konkretisierung des physikalischen Effektes zu einem Wirkprinzip wird ein funktionsorientiertes Modell zur Auswahl und Bewertung bereitgestellt (vgl. Abschnitt 2.1.3). Das Konzept modelliert die Gesamtheit der zur Lösung der Aufgabe geeigneten und durch Wirkprinzipien konkretisierte Teilfunktionen als Wirkstruktur.<sup>217</sup>

Das **Entwerfen** konkretisiert durch das Gestalten das Konzept zu einem Gesamtentwurf und schließt die Organisation des Gestaltungsprozesses mit ein.<sup>218</sup> Das Gestalten ist der umfangreichste Teilprozess der Produktentwicklung.<sup>219</sup> Erst in diesem Teilprozess der Produktentwicklung wird das zu entwickelnde Produkt durch das Lösen von Optimierungsproblemen, die i. d. R. nicht mathematisch abbildbar sind, gestaltet.<sup>220</sup> Das „Gestalten wird [...] als das Festlegen der Gestalt- und Werkstoffeigenschaften von Gestaltungselementen verstanden [...].“<sup>221</sup> Im Gegensatz zum Konzipieren stehen die physische und die geometrisch-stoffliche Realisierbarkeit im Vordergrund. Es werden Entscheidungen über die Werkstoffe, die Eigen- oder Fremdfertigung,<sup>222</sup> die Baugruppen und die konkrete Gestalt und damit über die Transformation des zu entwickelnden Produktes während der unternehmensnahen Fabrikationsprozesse des Produktlebenslaufes getroffen. Der Gesamtentwurf wird nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eindeutig und vollständig erarbeitet.<sup>223</sup> Es werden technische

---

<sup>212</sup> Pahl et al. 2007, S. 232

<sup>213</sup> Pahl et al. 2007, S. 54 bezeichnen den Zusammenhang zwischen physikalischem Effekt und Geometrie als Wirkprinzip.

<sup>214</sup> Wäldele 2012, S. 92ff.; Ponn und Lindemann 2011, S. 91ff. in Anlehnung an Pahl et al. 2007, S. 53ff.; Roth 2000, S. 107ff.

<sup>215</sup> Busemann 1991, S. 570 f; DIN 8580, S. 6; DIN 2330, S. 6; Bibliographisches Institut GmbH 2014g

<sup>216</sup> Busemann 1991, S. 570 f; DIN 8580, S. 6; DIN 2330, S. 6; Bibliographisches Institut GmbH 2014d

<sup>217</sup> Pahl et al. 2007, S. 54

<sup>218</sup> Pahl et al. 2007, S. 307; VDI 2223, S. 5

<sup>219</sup> Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 267

<sup>220</sup> Feldhusen et al. 2013b, S. 274

<sup>221</sup> VDI 2223, S. 8

<sup>222</sup> VDI 2223, S. 20

<sup>223</sup> Feldhusen et al. 2014, S. F 12

Eigenschaften über die Werkstoffe, die Hauptabmessungen und die Fertigungsverfahren festgelegt.<sup>224</sup> Auf der Gestaltmodellebene bedeutet die Konkretisierung ein Entwerfen von abhängigen durch unabhängige Eigenschaften.<sup>225</sup> Dies wird analog zum Verständnis des Zusammenhanges zwischen extensiven Eigenschaften von Gegenständen in Abhängigkeit der intensiven Eigenschaften von Stoffen durchgeführt. Dabei lassen sich die Merkmale der abhängigen Eigenschaften durch Merkmale der unabhängigen Eigenschaften beeinflussen.<sup>226</sup> Durch Leitlinien und Grundregeln des Gestaltens ist der Gestaltungsprozess von sich abwechselnden Analyse- und Synthesevorgängen geprägt.<sup>227</sup>

Das **Ausarbeiten** überführt die Informationen des fertigen Entwurfes in die Produktdokumentation.<sup>228</sup> Die Unterlagen sind für jede Anspruchsgruppe spezifisch. Es werden verbindliche Fertigungsunterlagen, beispielsweise nach den Normen der Reihe ISO 128 (vgl. Abschnitt 2.1.2) und Dokumente für den Nutzer erstellt.<sup>229</sup>

## 2.2 Das Verständnis der Nachhaltigkeit

Wie bereits in Abschnitt 1 dargelegt, sind in der konstruktionsmethodischen Forschung keine Ansätze zur Entwicklung nachhaltiger Produkte unter integraler und gleichrangiger Berücksichtigung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit vorhanden. In dieser Arbeit wird im Sinne der Entwicklung nachhaltiger Produkte die Verantwortung der Produktentwicklung von der ökologischen Wirkung, berücksichtigt durch die GPPe nach Abschnitt 2.1, hin zur ökonomischen und gesellschaftlichen Wirkung des zu entwickelnden Produktes entlang des Produktlebenslaufes erweitert.<sup>230</sup> Die Sozialbilanz zur Beurteilung der sozialen bzw. gesellschaftlichen Dimension der Nachhaltigkeit und die Lebenslaufkosten zur Beurteilung der ökonomischen Dimension der Nachhaltigkeit werden als Gegenstücke zur Ökobilanz angesehen, die ebenfalls auf der Betrachtung des gesamten Produktlebenslaufs beruht.<sup>231</sup>

In unterschiedlichen Forschungsdisziplinen präsentiert sich die Mehrdimensionalität der Nachhaltigkeit in unterschiedlichen Partialmodellen. In der Literatur sind Säulen- und Schalen-Modelle, geometrische Formen und Körper oder Schnittmengenmodelle und verschiedenste Variationen und Kombinationen verbreitet.<sup>232</sup> Sämtliche Par-

<sup>224</sup> Pahl et al. 2007, S. 305; Borsdorf 2007, S. 33

<sup>225</sup> Hubka 1984, S. 101; Ponn und Lindemann 2011, S. 133; Birkhofer und Wäldele 2008, S. 22ff.; sinngemäß auch in Gramlich 2013, S. 121; in VDI 2223, S. 12ff. werden unabhängige Produkteigenschaften als direkte festlegbare Eigenschaften bzw. Beschaffenheitseigenschaften und abhängige Produkteigenschaften als indirekte festlegbare Eigenschaften bzw. Funktions- bzw. Relationseigenschaften bezeichnet.

<sup>226</sup> Ponn und Lindemann 2008, S. 121

<sup>227</sup> Pahl et al. 2007, S. 312ff.

<sup>228</sup> Pahl et al. 2007, S. 552

<sup>229</sup> Pahl et al. 2007, S. 551ff.

<sup>230</sup> Hanusch und Birkhofer 2008, S. 211ff.; Yun-hee et al. 2009, S. 2

<sup>231</sup> Klöpffer 2003, S. 157

<sup>232</sup> von Hauff und Kleine 2009, S. 117ff.; Kleine 2009, S. 73ff.; Hanusch 2011, S. 9ff.

tialmodelle stimmen darin überein, dass die ökonomische, ökologische und gesellschaftliche<sup>233</sup> Dimension integrativ berücksichtigt wird (vgl. Abschnitt 1).<sup>234</sup> Die Standardisierung der Ökobilanz zur Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit hat dabei, trotz der herrschenden Wechselwirkung der Dimensionen, eine separate nicht integrale Betrachtung der Nachhaltigkeitsdimensionen zur Folge.<sup>235</sup>

Die klassischen Modelle zur Darstellung der ganzheitlichen Nachhaltigkeit als Hilfsmittel der Operationalisierung sind das Drei-Säulen-Modell, Schnittmengen- bzw. Dreiklangmodelle und das Nachhaltigkeitsdreieck nach Bild 2-6.<sup>236</sup>

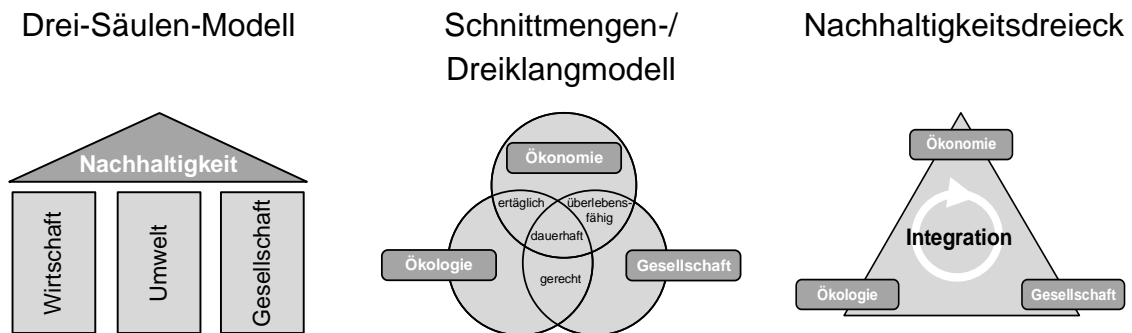


Bild 2-6: Die drei klassischen Modelle der Nachhaltigkeit<sup>237</sup>

In der Industrie hat sich zur qualitativen Beschreibung der Nachhaltigkeit das Drei-Säulen-Modell etabliert.<sup>238</sup> Die Nachhaltigkeit als Dach wird durch die drei Dimensionen, bildlich durch isoliert stehende Säulen dargestellt, getragen. Die Ebenbürtigkeit der Dimensionen wird über die Höhe der Säulen verbildlicht, die Qualität der Ziele durch den Durchmesser.<sup>239</sup> Darin liegt der Hauptkritikpunkt an dem zur Darstellung der Nachhaltigkeit verwendeten Säulenmodell. Die statische Überbestimmtheit lässt ein Entfernen einer Säule ohne eine Auswirkung auf das Dach zu.<sup>240</sup> Zudem ist eine Säule mit sehr kleinem Durchmesser nicht tragfähig.<sup>241</sup> Weiterhin sind durch isolierte Säulen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Dimensionen der Nachhaltigkeit über dieses Modell nicht abbildbar.<sup>242</sup>

Im Schnittmengenmodell werden die Dimensionen über die Kreise verbildlicht. Durch die Überlappung wird eine Abhängigkeit und Zugehörigkeit von Zielen mehrerer Dimensionen verdeutlicht. Die Schnittmenge aller drei Kreise repräsentiert den Zustand der Nachhaltigkeit. Dadurch wird die nachhaltige Entwicklung auf die Schnittmengen

<sup>233</sup> Hanusch 2011, S. 10 und Schäfer und Apostolov 2014, S. 372 benutzen *sozial* und *gesellschaftlich* synonym. Dubielzig 2009, S. 12ff. diskutiert unter Verweis auf andere Autoren die Bipolarität dieser Dimension. In dieser Arbeit wird die Terminologie der *gesellschaftlichen* Dimension bevorzugt. Die Benennung *soziale Dimension* impliziert ein gemeinnütziges bzw. selbstloses Bemühen, siehe hierzu Bibliographisches Institut GmbH 2014f und Kneer und Kilian 2000, S. 495.

<sup>234</sup> Blank 2001, S. 375ff.

<sup>235</sup> Kloepffer 2008, S. 93

<sup>236</sup> Pufé 2012b, S. 33ff.

<sup>237</sup> Pufé 2012b, S. 34

<sup>238</sup> Schäfer und Apostolov 2014, S. 372

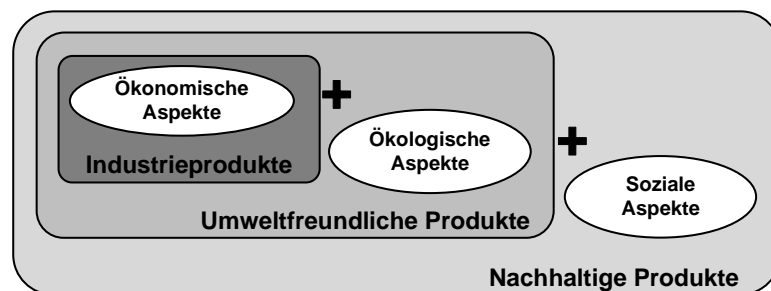
<sup>239</sup> von Hauff und Kleine 2009, S. 117

<sup>240</sup> von Hauff und Kleine 2009, S. 117

<sup>241</sup> von Hauff und Kleine 2009, S. 118

<sup>242</sup> von Hauff und Kleine 2009, S. 118; Schäfer und Apostolov 2014, S. 372

beschränkt.<sup>243</sup> Beispielsweise sieht die *Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Cooperation and Development-OECD)* eine hinreichende Bedingung für die nachhaltige Entwicklung in der Schnittmengenbildung zweier Dimensionen.<sup>244</sup> Die Darstellung von Schnittmengen suggeriert zudem eine völlige Widerspruchsfreiheit zwischen den Dimensionen.<sup>245</sup> Eine „Steigerung“ der Nachhaltigkeit ist somit durch eine Vergrößerung eines Kreises möglich. Diese Betrachtung der voneinander unabhängigen Dimensionen der Nachhaltigkeit über eine Mengendarstellung wird für die Definition eines nachhaltigen Produktes durch YUN-HEE ET AL. entsprechend Bild 2-7 zugrunde gelegt.



**Bild 2-7: Definitoren Darstellung eines nachhaltigen Produktes<sup>246</sup>**

Ein nachhaltiges Produkt erfüllt ökonomische, ökologische und soziale Aspekte. Ein ökonomisches Industrieprodukt ist dabei eine Teilmenge umweltfreundlicher Produkte, die wiederum eine Teilmenge nachhaltiger Produkte darstellt.

Für die Betrachtung der Nachhaltigkeit in der Konstruktionsforschung hat sich das Dreiecksmodell zur Darstellung der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen der ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Dimension durchgesetzt. Das Dreieck spiegelt den Grundgedanken der Nachhaltigkeit im Vergleich zu den anderen zwei klassischen Modellen der Nachhaltigkeit am deutlichsten wider.<sup>247</sup>

In dem von HANUSCH präsentierten Nachhaltigkeitsdreieck nach Bild 2-8 steht im Zentrum des Interesses das (zu entwickelnde) Produkt. Der Produktlebenslauf wird unter den einzelnen Dimensionen der Nachhaltigkeit aufgeteilt. „Die Gesellschaft dient beispielsweise der Bereitstellung von Arbeitskraft für die ökonomische Dimension [...]“<sup>248</sup> Umgekehrt stellt die ökonomische Dimension der Gesellschaft Güter und Dienstleistungen zur Verfügung, zu denen das Produkt gehört. Somit werden ver- und bearbeitende Prozesse der Ökonomie zugeordnet. Die Nutzung der Güter und Dienstleistungen und damit auch des Produktes findet in der Gesellschaft statt, ohne die zu erwartende negative Wirkung auf die Ökologie durch die stattfindenden Nutzungsprozesse. Dass Produkte auch zur Leistungserstellung als Investitionsgüter eingesetzt werden,

<sup>243</sup> von Hauff und Kleine 2009, S. 119

<sup>244</sup> OECD 2000, S. 139ff.

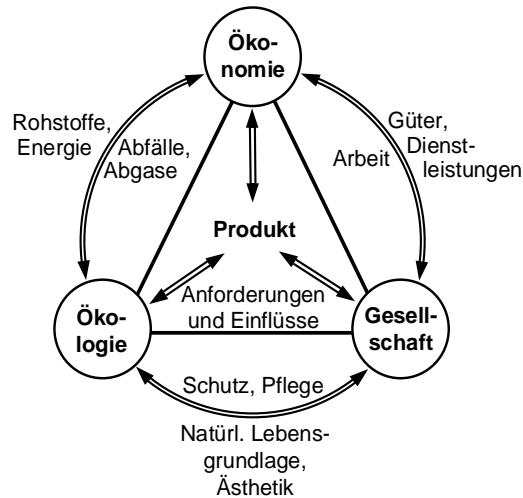
<sup>245</sup> Müller-Christ 2001, S. 72ff.

<sup>246</sup> in Anlehnung an Yun-hee et al. 2009. S. 2

<sup>247</sup> Zukunftskommission der Friedrich-Ebert-Stiftung 1998, S. 21ff.

<sup>248</sup> Hanusch 2011, S. 54

wird nicht berücksichtigt. Die Ökonomie dagegen besitzt eine negative Wirkung auf die Ökologie durch die Abfälle und Abgase der ver- und bearbeitenden Prozesse.



**Bild 2-8: Der Zusammenhang zwischen technischen Produkten und den Dimensionen der Nachhaltigkeit<sup>249</sup>**

Dieses Modell zeigt das herrschende inkonsistente Verständnis der Nachhaltigkeit und der fehlenden konsistenten Strukturierung und Kategorisierung der Dimensionen auf. Dies wird besonders an der gesellschaftlichen Dimension deutlich. Obwohl der Einsatz des Produktes in der Gesellschaft erfolgt, hat dieser keine Wirkung auf die Ökologie, wie sie beispielsweise die ver- und bearbeitenden Prozesse innerhalb der Ökonomie haben. Daher wird im Folgenden näher auf die Dimensionen der Nachhaltigkeit eingegangen und auf Grundlage des allgemeinen Verständnisses ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Zusammenhänge eine Abgrenzung der Dimensionen durchgeführt. Ziel ist die Eingrenzung möglicher Aktionsparameter der Produktentwicklung auf die Nachhaltigkeit. Dabei werden in Bezug auf Abschnitt 2.1.3 die Nachhaltigkeitseigenschaften des Produktes als von Gestalt- und Werkstoffeigenschaften abhängig verstanden.

### 2.2.1 Die Dimensionen der Nachhaltigkeit

Der Begriff der *Dimensionen der Nachhaltigkeit* hat sich seit Mitte der 1990er Jahre international durchgesetzt.<sup>250</sup> Eine Definition der Dimension im Kontext der Nachhaltigkeit wird jedoch nicht vorgenommen. HAUF UND KLEINE setzten die Dimensionen der Nachhaltigkeit mit dem ökologischen, ökonomischen bzw. gesellschaftlichen Kapital gleich.<sup>251</sup> In diesem Kapitel wird in Anlehnung an die physikalische Dimension als quantitative Erfassung von Phasengrenzen mehrerer Medien der Dimensionsbegriff zur Abgrenzung von Systemen durch eine Systemgrenze verstanden.<sup>252</sup>

<sup>249</sup> Hanusch 2011, S. 54

<sup>250</sup> von Hauff und Kleine 2009, S. 17 nach Blank 2001, S. 375ff.

<sup>251</sup> von Hauff und Kleine 2009, S. 23

<sup>252</sup> Zum Dimensionsbegriff siehe auch Stoffel 2014, S. 51.

### 2.2.1.1 Die ökologische Dimension

Im Sinne des *Brundtland-Berichtes* wird unter der ökologischen Nachhaltigkeit die Erhaltung des ökologischen Systems verstanden.<sup>253</sup> Die ökologische Dimension bildet das ökologische System bzw. die Umwelt ab.<sup>254</sup> Für die Umwelt werden fälschlicherweise die Begriffe Ökosphäre<sup>255</sup>, Geosphäre und Biosphäre synonym verwendet.<sup>256</sup> Durch anthropogene<sup>257</sup> Stoffeinträge bzw. -austräge wirkt der Mensch auf die Ökosphäre ein. Sie dient als Quelle für Rohstoffe und Senke für Emissionen.<sup>258</sup> Als verantwortliche Akteure sieht VON HAUFF die Politik, Unternehmen, Haushalte und Verbände wie die Gewerkschaften.<sup>259</sup> Ökologisch nachhaltige Unternehmen werden beispielsweise folgenden drei grundlegenden Ansprüchen gerecht:<sup>260</sup>

1. Der Verbrauch natürlicher Ressourcen oder Substitute während der Leistungserstellung liegt unter der natürlichen Reproduktion oder technischen Produktion.
2. Die Abgabe von Emissionen oder Stoffen während der Leistungserstellung in die Ökosphäre ist geringer als ihre Fähigkeit der Absorption.
3. Es findet keine Beteiligung der Unternehmen an Aktivitäten statt, die die Ökosystemleistung abbaut.

Innerhalb der Produktlebenslaufbetrachtung haben entsprechend die Hersteller von Werkstoffen, die Produzenten von Produkten wie auch der Nutzer die Aufgabe ihr Verhalten an die Beanspruchbarkeit der Ökosphäre anzupassen.

Die Methodik der Ökobilanz geht nach der Modellvorstellung der Ökosphäre davon aus, dass sämtliche anthropogenen Einträge in die Ökosphäre in Form von Emissionen und Austrägen aus der Ökosphäre, beispielsweise durch Rohstoffabbau, zu einer Umweltwirkung führen.<sup>261</sup> Diese anthropogenen Ein- und Austräge werden auch als Elementarflüsse bezeichnet.<sup>262</sup> Die Quantifizierung der Elementarflüsse einzelner Prozesse erfolgt über die Sachbilanz.<sup>263</sup> Sie individualisiert die realen Material- und Energieflüsse innerhalb der Technosphäre<sup>264</sup> in die für das Partialmodell der Wirkungsabschätzung als Datenbasis dienenden Elementarflüsse.<sup>265</sup> Dabei werden nicht nur die

<sup>253</sup> von Hauff und Kleine 2009, S. 18

<sup>254</sup> Enquete-Kommission 1998, S. 25

<sup>255</sup> Huggett 1999, S. 430 sieht in den Terminus der *Ökosphäre* als am geeignetesten an, um die Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Menschen mit ihrer Umwelt durchzuführen.

<sup>256</sup> Bahadir et al. 2000, S. 199

<sup>257</sup> In der Literatur wird der Einfluss der technischen Prozesse, die den anthropogenen Einfluss auf die Dimensionen der Nachhaltigkeit modellieren, bei der Modellbildung der Nachhaltigkeit nicht berücksichtigt.

<sup>258</sup> Enquete-Kommission 1998, S. 25; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 1996, S. 3f.

<sup>259</sup> von Hauff 2011, S. 16

<sup>260</sup> Dyllick und Hockerts 2002, S. 133; VDI 4070 Blatt 1, S. 14 schlägt entsprechende Kenngrößen vor.

<sup>261</sup> DIN EN ISO 14040, S. 7

<sup>262</sup> DIN EN ISO 14040, S. 9; DIN EN ISO 14040, S. 24

<sup>263</sup> DIN EN ISO 14040, S. 5; DIN EN ISO 14040, S. 25ff.

<sup>264</sup> DIN EN ISO 14040, S. 25 spricht von dem Produktsystem als Betrachtungsobjekt für die Sachbilanz. Es ist eine „Zusammenstellung von Prozessmodulen mit Elementar- und Produktflüssen, die den Lebensweg eines Produktes modelliert und die eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllt“ DIN EN ISO 14040, S. 11. Da mit Prozessmodulen anthropogen verursachte Prozesse gemeint sind, wird hier nach Abschnitt 2.1.2 von der Technosphäre gesprochen.

<sup>265</sup> DIN EN ISO 14040, S. 10

direkten Elementarflüsse des betrachteten Transformationssystems bilanziert. Es erfolgt ebenfalls eine Allokation bzw. eine Zuordnung der Elementarflüsse, die durch die Lebensläufe der für die betrachteten Transformationssysteme nötigen Betriebsmittel und -stoffe entstehen.<sup>266</sup> Im Gegensatz zu der Produktlebenslaufbetrachtung nach der GPPe werden somit sämtliche Transformationssysteme, die mit dem Lebenslauf des zu entwickelnden Produktes über Material- und/oder Energieflüsse in Verbindung stehen, berücksichtigt. Sie sind von den unabhängigen Werkstoff- und Gestalteigenschaften des zu entwickelnden Produktes, wie auch von den abhängigen Eigenschaften möglicher Fertigungs- oder Montagearten<sup>267</sup> und den dafür verwendeten Betriebsmitteln und -stoffen abhängig. Die Elementarflüsse werden durch ein Partialmodell über Charakterisierungsfaktoren zu einem Wirkungsindikatorwert individualisiert.<sup>268</sup> Die Wirkungsindikatorwerte führen durch physikalische, chemische und biologische Prozesse, die auch als Umweltwirkungsmechanismen bezeichnet werden, zu Änderungen von Eigenschaften der Ökosphäre und damit zu einer Umweltwirkung.<sup>269</sup> Die Quantifizierung der Umweltwirkung erfolgt durch eine Individualisierung der Wirkungsindikatorwerte über die Partialmodelle der Umweltmechanismen zu einem Wirkungsindikator.<sup>270</sup> Dabei werden die Umweltwirkungen in Kategorien wie die Erderwärmung, den Abbau der Ozonschicht oder die Humantoxizität aufgeteilt.<sup>271</sup>

„Die Erstellung einer Ökobilanz wird zwar durch Computerprogramme unterstützt, ist jedoch trotzdem sehr aufwendig.“<sup>272</sup> Zur Abschätzung der ökologischen Wirkung kommen auch vereinfachte ökologische Bewertungsmethoden zum Einsatz.<sup>273</sup> Sie verringern den Aufwand der Bilanzierung der Einflüsse von Transformationssystemen auf die Ökosphäre. Bei der Methode *Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS)*<sup>274</sup> wird beispielsweise der Material-Input als Pendant zu den Wirkungsindikatorwerten der Ökobilanz durch die Individualisierung der Materialflüsse über die Material-Intensitäten (MI) berechnet.<sup>275</sup> Die MIPS-Methode geht über die Bilanzierung der Menge der Stoffe der MI-Kategorien nicht hinaus und sieht keine Individualisierung eines Wirkungsindikators vor.

Beim Vergleich zweier Transformationssysteme ist dasjenige mit den geringeren Wirkungsindikatorwerten bzw. -indikatoren ökologisch nachhaltiger.<sup>276</sup> Eine absolute Aussage über die ökologische Nachhaltigkeit ist weder durch die Ökobilanz<sup>277</sup> noch durch die vereinfachten ökologischen Bewertungsmethoden vorgesehen. Somit liegt die Auf-

<sup>266</sup> DIN EN ISO 14040, S. 10

<sup>267</sup> VDI 2223, S. 13

<sup>268</sup> DIN EN ISO 14044, S. 39ff.

<sup>269</sup> DIN EN ISO 14044, S. 13

<sup>270</sup> DIN EN ISO 14044, S. 37ff.

<sup>271</sup> Kloepffer und Grahl 2009, S. 204; ISO/TR 14047, S. 18ff.

<sup>272</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 570

<sup>273</sup> Zhao 2013, S. 21

<sup>274</sup> Bei Schmidt-Bleek und Klütting 1993, S. 108: *Material-Intensität pro Serviceeinheit*, bei Ritthoff et al. 2002, S. 9: *Material-Input pro Serviceeinheit*; aufgrund Formel (4) wird hier *Material-Input pro Serviceeinheit* verwendet.

<sup>275</sup> Ritthoff et al. 2002, S. 14

<sup>276</sup> DIN EN ISO 14040, S. 10.

<sup>277</sup> DIN EN ISO 14044, S. 9ff.; Birkhofer und Grüner 2002, S. 221

gabe der Produktentwicklung bezüglich der ökologischen Nachhaltigkeit in der Auswahl der Konzept-, Gestalt- bzw. Produktvariante mit dem geringsten synthetisierten Wirkungsindikator bzw. -indikatorwert.<sup>278</sup>

### **2.2.1.2 Die ökonomische Dimension**

Die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit bildet sämtliche Bereiche ökonomischer Aktivitäten ab.<sup>279</sup> Sie wird auch als Ökonosphäre bezeichnet.<sup>280</sup> Das allgemeine Verständnis des ökonomisch nachhaltigen Zustandes unterscheidet sich auf volkswirtschaftlicher bzw. betriebswirtschaftlicher Ebene und auf Ebene von Privathaushalten nicht.<sup>281</sup> Unabhängig von der betrachteten Wirtschaftseinheit<sup>282</sup> funktioniert ein ökonomisch nachhaltiges Wirtschaften auf lange Zeit.<sup>283</sup> Die Einnahmen innerhalb einer Zeitperiode dürfen die Ausgaben in derselben Zeitperiode nicht überschreiten.<sup>284</sup> Vonseiten des Gesetzgebers wird die ökonomische Nachhaltigkeit sinngleich für unterschiedliche Wirtschaftseinheiten gemäß *Insolvenzordnung (InsO)* durch die Zahlungsunfähigkeit und die Überschuldung eines Schuldners implizit definiert.<sup>285</sup>

„Überschuldung liegt vor, wenn das Vermögen des Schuldners die bestehenden Verbindlichkeiten nicht mehr deckt. Bei der Bewertung des Vermögens des Schuldners ist jedoch die Fortführung des Unternehmens zugrunde zu legen, wenn diese nach den Umständen überwiegend wahrscheinlich ist.“<sup>286</sup>

Die Insolvenzgründe beziehen sich damit auf die Möglichkeit eines Schuldners jetzt und in Zukunft den Zahlungsverpflichtungen nachzukommen, also auf die Liquidität<sup>287</sup>.

Kennzahlen zur Bilanzierung der ökonomischen Nachhaltigkeit bewegen sich entsprechend den Wirtschaftseinheiten auf unterschiedlichen Aggregationsebenen.<sup>288</sup> Typische volkswirtschaftliche Kennzahlen sind die Inflationsrate, die Staatsverschuldung oder das Bruttoinlandsprodukt.<sup>289</sup> Sie werden auch als gesamtgesellschaftliche Kennzahlen<sup>290</sup> bezeichnet.<sup>291</sup> Ökonomisch nachhaltige Unternehmen garantieren zu jeder

<sup>278</sup> Nach DIN EN ISO 14044, S. 8 ist eine Auswertung der Ökobilanz anhand der Wirkungsindikatoren und/oder -indikatorwerten zugelassen.

<sup>279</sup> Boulding 2006, S. 11

<sup>280</sup> Boulding 2006, S. 11ff.

<sup>281</sup> Je nach Wirtschaftseinheit wird das zu entwickelnde Produkt als Konsum- oder als Investitionsgut verstanden.

<sup>282</sup> Barthelmes 2013, S. 9 unterscheidet die Wirtschaftseinheiten Privathaushalt, Betriebe und öffentliche Haushalte. Bei Privathaushalten werden zwischen Einzelpersonen und Familien, bei Betrieben zwischen Unternehmen, Verwaltungen und öffentlichen Betrieben unterschieden.

<sup>283</sup> Drumbel 2012, S. 157

<sup>284</sup> Hicks 1946, S. 172

<sup>285</sup> InsO § 12 Abs. (2)

<sup>286</sup> InsO § 19 Abs. (2); dieses Verständnis gilt auch für Privathaushalte während des Verbraucherinsolvenzverfahrens nach InsO § 300 Abs. (1).

<sup>287</sup> Die Liquidität ist nach Thommen und Achleitner 2012, S. 567f. und Thommen und Achleitner 2012, S. 646ff. eine Kennzahl zur Beurteilung der Zahlungsbereitschaft bzw. der Solvenz eines Unternehmens oder einer Privatperson.

<sup>288</sup> Bardt 2011, S. 13

<sup>289</sup> Bardt 2011, S. 14ff.

<sup>290</sup> Dierkes 1974, S. 44ff. benutzt die volkswirtschaftlichen Kennzahlen als Indikatoren für die gesellschaftliche Dimension.

<sup>291</sup> Dierkes 1974, S. 33; Dierkes 1974, S. 44ff.

Zeit einen Geldfluss in genügender Höhe zur Sicherstellung der Liquidität.<sup>292</sup> Die ökonomische Nachhaltigkeit eines Unternehmens wird somit mit dem wirtschaftlichen Erfolg gleichgesetzt,<sup>293</sup> der u. a. durch die Kennzahlen des Betriebsergebnisses, der Eigenkapitalquote oder der Kapitalrendite wiedergegeben wird<sup>294</sup>. Die betriebswirtschaftlichen Kennzahlen entsprechen den klassischen finanzwirtschaftlichen Kennzahlen,<sup>295</sup> die für die Bilanzanalyse einer Periode erhoben werden.<sup>296</sup> Sie sind i. d. R. produktübergreifend, da in dem Bilanzierungszeitraum eines Unternehmens mehrere Produkte gleichzeitig entwickelt oder vertrieben werden. Somit sind die Partialmodelle zu der Methode zur Bestimmung der betriebswirtschaftlichen Kennzahlen inkonsistent zur Lebenszyklus-Kostenrechnung. Während bei der Lebenszyklus-Kostenrechnung der Lebenszyklus eines Produktes das zeitliche Verkürzungsmerkmal darstellt, wird bei der klassischen Kostenrechnung die Bilanzierungsperiode zur Modellierung genutzt.<sup>297</sup> Der Lebenszyklus eines Produktes fällt i. d. R. nicht mit dem Bilanzzeitraum eines Unternehmens zusammen.<sup>298</sup> Die Methode der Lebenszyklus-Kostenrechnung berücksichtigt ausschließlich die Kosten eines Produktes,<sup>299</sup> die Bilanzierungsmethoden erfassen zudem auch Einnahmen in Form von beispielsweise Umsätzen.

Das zu entwickelnde Produkt trägt somit zur ökonomischen Nachhaltigkeit des entwicklungsnahe Unternehmens bei, wenn es zum wirtschaftlichen Unternehmenserfolg beiträgt.<sup>300</sup> Aus Sicht des Unternehmens beeinflusst die Produktentwicklung über die Kosten als abhängige Eigenschaften<sup>301</sup> die ökonomische Nachhaltigkeit. Beispielsweise beeinflusst die Produktentwicklung bis zu 70 % der Selbstkosten eines Produktes.<sup>302</sup>

Bei unternehmerischen Ausgaben bzw. Einnahmen wird auch von Nominalgüterflüssen gesprochen.<sup>303</sup> Nominalgüter sind immaterielle Güter wie Geld und Ansprüche auf Geld, Darlehen oder Beteiligungen. Sie bilden den nominellen Geldwert von Realgütern des Beschaffungs- und Absatzmarktes ab (vgl. Bild 2-9).<sup>304</sup>

---

<sup>292</sup> Dyllick und Hockerts 2002, S. 133; Loew et al. 2004, S. 66

<sup>293</sup> Hanusch 2011, S. 43

<sup>294</sup> VDI 4070 Blatt 1, S. 12

<sup>295</sup> Töpfer 2007, S. 1059–1063

<sup>296</sup> Heesen und Gruber 2014, S. 111ff.

<sup>297</sup> Joos-Sachse 2006, S. 290f.

<sup>298</sup> „Meistens wird nicht nach den Gesamtkosten während der gesamten Lebensdauer des Produktes, den sogenannten "Life-Cycle-Costs" gefragt, sondern nach den Gesamtkosten, die durchschnittlich pro Jahr anfallen“ VDI 2225 Blatt 1, S. 9. Diese Diskrepanz führt dazu, dass Investitionsgüter mit geringeren Anschaffungskosten von Unternehmen vor Investitionsgütern mit geringeren über den Lebenszyklus summierten Kosten bevorzugt werden. Geringere Anschaffungskosten schlagen sich in der Bilanzierung über eine Periode schwächer nieder als geringere Lebenszykluskosten trotz höherer Anschaffungskosten.

<sup>299</sup> Woodward 1997, S. 335ff.

<sup>300</sup> Sutcliffe et al. 2009, S. 292ff.

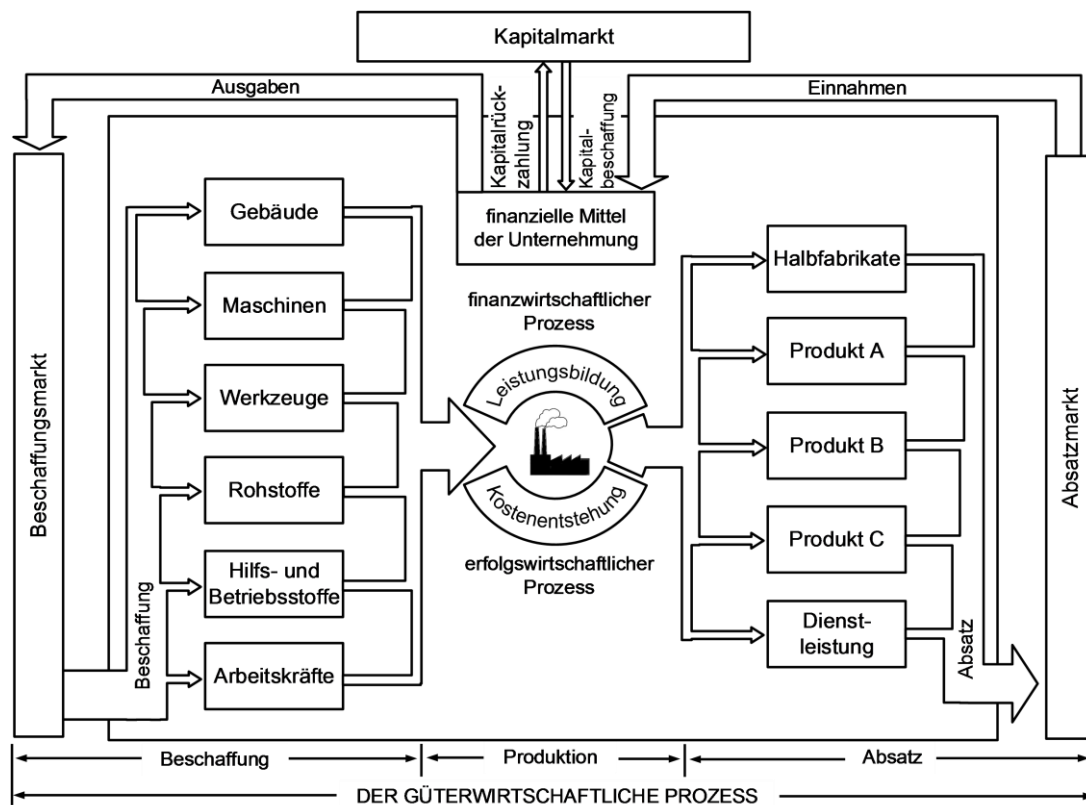
<sup>301</sup> VDI 2223, S. 13

<sup>302</sup> VDI 2235, S. 3

<sup>303</sup> Kosiol 1968, S. 138; VDI 2234, S. 9

<sup>304</sup> Kosiol 1968, S. 136

Realgüter werden in körperliche Sachgüter wie Material, Erzeugnisse und Gebäude und immaterielle Realgüter wie Arbeitskraft bzw. Humankapital<sup>305</sup>, Dienste oder Informationen unterteilt.<sup>306</sup> Die leistungswirtschaftlichen Bearbeitungsprozesse innerhalb des produktentwicklungsnahen Unternehmens, in Bild 2-9 als *erfolgwirtschaftlicher Prozess* bezeichnet, benötigen diese Realgüter zur Leistungsbildung.<sup>307</sup>



**Bild 2-9: Das Partialmodell der Betriebswirtschaft<sup>308</sup>**

Als Leistung wird die bewertete sachzielbezogene Nominalgüterentstehung im Rahmen betrieblicher Tätigkeiten bezeichnet, was der Veredelung entspricht.<sup>309</sup> Die beschafften Realgüter werden durch eine Veredelung zu absetzbaren Realgütern bzw. Produkten transformiert. Durch den Absatz erfolgt ein Geldanspruch seitens des Unternehmens an den Absatzmarkt und es fließen positive Nominalgüter in Form von Einnahmen. Dabei werden nicht ausschließlich die zu entwickelnden Produkte abgesetzt. Das produktentwicklungsnahen Unternehmen stellt anderen Transformationssystemen der Technosphäre ebenfalls Material zur Verwertung bzw. Verwendung und Leistungen zu Verfügung.<sup>310</sup> Innerhalb der leistungswirtschaftlichen Prozesse, die den produktentwicklungsnahen Teilprozessen der Bearbeitung entsprechen, erfolgt somit eine Wertschöpfung bezogen auf die gesamte Prozesskette vom Eingang der Realgü-

<sup>305</sup> Mohr 1997, S. 13; Dyllick und Hockerts 2002, S. 134; von Hauff und Kleine 2005, S. 10

<sup>306</sup> Kosiol 1968, S. 138, VDI 2234, S. 8

<sup>307</sup> VDI 2234, S. 8

<sup>308</sup> VDI 2234, S. 8

<sup>309</sup> Westkämper 2006, S. 33ff.;

<sup>310</sup> Zu den Umsätzen, die dem Produkt zugeschrieben werden, zählen nach Statistisches Bundesamt 2015b, S. 317 ebenfalls Erlöse aus Reparaturen oder den Verkauf von Koppelprodukten.

ter in das produktentwicklungsnahe Unternehmen bis zum Ausgang hin zum Absatzmarkt.<sup>311</sup> Die reinen Finanzbewegungen über den Kapitalmarkt sind unabhängig von Realgüterflüssen.<sup>312</sup> Sie dienen der Beschaffung von Fremdkapital.<sup>313</sup> I. d. R. ist der Nominalgüterfluss des Kapitalmarktes in das Unternehmen durch Zinsen geringer als der aus dem Unternehmen.<sup>314</sup> Die Zinsen werden den Kosten zugerechnet.<sup>315</sup> Der Umsatz entspricht den Nominalgüterflüssen des Absatzmarktes in das Unternehmen und wird bei Sachgütern bzw. Gegenständen über das Produkt aus Absatzmenge und dem Mengenpreis berechnet.<sup>316</sup> Die Verrechnung der Realgüterflüsse zu den Nominalgüterflüssen der Ausgaben und der Einnahmen zum finanzwirtschaftlichen Gewinn bzw. Verlust erfolgt in der Finanzwirtschaft über die Geldeinheit (Ge)-Äquivalente mit entsprechenden Vorzeichen.<sup>317</sup> Die Finanzwirtschaft bildet die Büroprozesse<sup>318</sup> ab. Die Finanzwirtschaft umfasst die Beschaffung von Kapital und dessen Verwendung.<sup>319</sup> Ihr Hauptziel innerhalb eines Unternehmens ist die Sicherstellung der Liquidität als Kennzahl des ökonomisch nachhaltigen Zustandes (vgl. Abschnitt 2.2.1.2).<sup>320</sup> Somit bildet die Finanzwirtschaft des Unternehmens, in Bild 2-9 mit *finanzielle Mittel der Unternehmung* umschrieben, die Ökonosphäre desselben ab. Die Finanzwirtschaft individualisiert über betriebswirtschaftliche Geschäftsprozesse<sup>321</sup> die Liquidität. Sie individualisiert die Liquidität über die Flüsse positiver Nominalgüter bzw. die Einnahmen und den Fluss negativer Nominalgüter bzw. den Ausgaben als ökonomische Indikatorwerte über unternehmensspezifische ökonomische Partialmodelle. Nach THOMSEN wird die Liquidität über die flüssigen bzw. liquiden Mittel, die den Bilanzposten des Handelsgesetzbuches (HGB) *Kassenbestand, Bundesbankguthaben, Guthaben bei Kreditinstituten* und *Schecks* und ggf. *sonstige Wertpapiere* entsprechen, individualisiert.<sup>322</sup>

Aus Sicht des Kunden wird analog zu den Ausführungen dieses Abschnittes der ökonomisch nachhaltige Zustand durch eine positive Summe aus Ausgaben und Einnahmen erreicht. Dabei wird zwischen Kunden der Investitions- und Konsumgüterindustrie unterschieden.<sup>323</sup> Kunden der Investitionsgüterindustrie schöpfen durch das Produkt als Operator, beispielsweise während einer Ver- oder Bearbeitung, Wert für das Unternehmen durch die Transformation eines Materiales im Sinne einer Veredelung.<sup>324</sup>

---

<sup>311</sup> Kiener et al. 2009, S. 4–5

<sup>312</sup> Kosiol 1968, S. 145

<sup>313</sup> VDI 2234, S. 6f.

<sup>314</sup> VDI 2234, S. 16

<sup>315</sup> VDI 2234, S. 16

<sup>316</sup> VDI 2234, S. 28

<sup>317</sup> In Anlehnung an VDI 2234, S. 9; die Analogie zur Sachbilanzierung ist erkennbar.

<sup>318</sup> Berkau 1998, S. 27

<sup>319</sup> Zantow und Dinauer 2011, S. 36

<sup>320</sup> Zantow und Dinauer 2011, S. 36ff.

<sup>321</sup> Berkau 1998, S. 27

<sup>322</sup> Thomsen 2010, S. 219ff.

<sup>323</sup> Schabacker und Vajna 2014, S. 545f.

<sup>324</sup> Westkämper 2006, S. 33ff.;

Technisch-wirtschaftliche Gründe entscheiden über den Kauf.<sup>325</sup> Die Nutzungskosten<sup>326</sup> sind bekannt und werden durch den Lieferanten des Investitionsgutes zur Verfügung gestellt.<sup>327</sup> Das Investitionsgut ist direkt an einer Leistungserstellung und damit einem positiven Nominalgüterfluss beteiligt. Im Unterschied zu Investitionsgütern führen Konsumgüter in der Nutzung durch Basis-, Leistungs- und Begeisterungseigenschaften<sup>328</sup> zu einem subjektiven Nutzen bzw. Wert für den Kunden.<sup>329</sup>

Somit sieht sich die Produktentwicklung in Bezug auf das Erreichen eines ökonomisch nachhaltigen Zustandes nicht nur vor die Aufgabe gestellt unterschiedliche Anspruchsgruppen in Form des produktentwicklungsnahen Unternehmens und des Kunden und deren variablen Verhaltens und vermeintlich irrationale oder diffuse Anforderungen<sup>330</sup> zu berücksichtigen. Sondern auch sind während der Produktentwicklung aufgrund der unterschiedlichen Anspruchsgruppen unterschiedliche Methoden und Partialmodelle zur Bestimmung der Einnahmen und Ausgaben einzelner Anspruchsgruppen als Indikatorwerte eines ökonomisch nachhaltigen Zustandes zu berücksichtigen.

### **2.2.1.3 Die gesellschaftliche Dimension**

Im Gegensatz zu den beiden anderen Dimensionen ist die gesellschaftliche Dimension der Nachhaltigkeit inhaltlich nicht ausgestaltet (siehe Abschnitt 1).<sup>331</sup> Das liegt nicht zuletzt an dem Verständnis der Gesellschaft. Unter Gesellschaft wird die „Gesamtheit der Menschen, die zusammen unter bestimmten politischen, wirtschaftlichen und sozialen Verhältnissen leben“<sup>332</sup>, verstanden. Sie grenzt sich territorial von anderen Gesellschaften ab und ist durch eine normative Sozialstruktur geprägt.<sup>333</sup> In der Sozialwissenschaft wird auch von der Soziosphäre gesprochen.<sup>334</sup> Sie beinhaltet die Menschen und ihre Organisation untereinander.<sup>335</sup> Sie hat sich über die Jahrhunderte unter dem Einfluss der Religionen, nationaler Verfassungen und der Gesetzgebungen entwickelt.<sup>336</sup> Somit legt das Verständnis der Gesellschaft die Verkürzungsmerkmale auf territoriale Gebiete mit der gleichen oder ähnlichen normativen Sozialstruktur und einer ähnlichen zwischenmenschlichen Organisation fest.

<sup>325</sup> Ehrlenspiel et al. 2013, S. 31

<sup>326</sup> Unter Nutzungskosten werden in Anlehnung an Dannheim 1999, S. 46. nach Dannheim und Birkhofer 1998, S. 28 die Kosten für den Kauf, die Inbetriebnahme, die Benutzung, die Wartung bzw. Reparatur und die Außerbetriebnahme verstanden.

<sup>327</sup> Schabacker und Vajna 2014, S. 545; VDI 2884, S. 3 stellen eine Methode zur kundenseitigen Abschätzung der Nutzungskosten von Investitionsgütern ab dem Kauf bzw. der Beschaffung bereit. Bode et al. 2011, S. 12ff. haben ebenfalls eine standardisierte Erfassung der Nutzungskosten für Investitionsgüter erarbeitet, die als Grundlage des VDMA-Einheitsblattes 34160 dient. Beide Methoden berücksichtigen durch die zugrunde gelegten Partialmodelle ausschließlich den Lebenszyklusteil der Nutzung (gate-to-grave). Beispielsweise wird bei VDMA 34160, S. 3 als Lebenszyklus die Entstehung mit den Kostenelementen Anschaffung, Inbetriebnahme und Infrastruktur, den Betrieb und die Verwertung als Verkürzungsmerkmal des Lebenszyklus definiert.

<sup>328</sup> Kano et al. 1984, S. 147ff.

<sup>329</sup> Redlich 2011, S. 23

<sup>330</sup> Ehrlenspiel et al. 2013, S. 31.

<sup>331</sup> u. a. von Hauff und Kleine 2009, S. 20; Müller 2002, S. 15; Hanusch 2011, S. 33; Maxwell et al. 2003, S. 888; Leinscheid 2000, S. 501

<sup>332</sup> Bibliographisches Institut GmbH 2014c

<sup>333</sup> o. V. 1981, S. 20

<sup>334</sup> Boulding 2006, S. 12ff.

<sup>335</sup> Boulding 1978, S. 22

<sup>336</sup> Kassas 1987, S. 119

Zur Beschreibung einer gesellschaftlich nachhaltigen Entwicklung werden Schlagworte wie die Grundbedürfnisbefriedigung und Verwirklichungschancen,<sup>337</sup> Chancengleichheit und Partizipation am materiellen Wohlstand<sup>338</sup> oder die „selbstbestimmte Lebensführung durch eigene Arbeit“<sup>339</sup> verwendet. Im Zusammenhang mit der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit wird auch vom Konzept des Sozialkapitales gesprochen.<sup>340</sup> Im Gegensatz zum Humankapital der Ökonosphäre (vgl. Abschnitt 2.2.1.2) berücksichtigt das Sozialkapital nicht das ökonomische Leistungspotenzial einer Bevölkerung<sup>341</sup>, sondern die Eigenschaften sozialer Strukturen der menschlichen Interaktion.<sup>342</sup> Das Verständnis des Sozialkapitales ist in der Soziologie nicht eindeutig. Ein einheitliches Verständnis bzw. eine einheitliche Modellierung ist nicht zu finden.<sup>343</sup> EMPACHER UND WEHLING bezeichnen es als „diffus“.<sup>344</sup> PUTNAM modelliert das Sozialkapital durch die Unterscheidung zwischen dem Sozialkapital, das zwischen unterschiedlichen Menschen wie Arbeitskollegen *Brücken bildet* und dem Sozialkapital, das ähnliche Menschen wie Familienmitglieder zusammenbringt und *bindet*.<sup>345</sup> WOOLCOCK erweitert das Modell um eine *Verbindung* der Menschen zu der institutionellen Ebene, die den Rahmen der menschlichen Interaktion repräsentiert.<sup>346</sup> Die leistungswirtschaftliche Nutzung von Humankapital setzt vorhandenes Sozialkapital voraus.<sup>347</sup>

Analog zu den Schlagworten wird ein entsprechendes Spektrum an instrumentell-funktionellen Indikatoren zur Analyse der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit verwendet. Beispielsweise schlägt die OECD fünf Indikator-Bereiche mit mehr als 40 Indikatoren zur Bewertung der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit der Mitgliedsstaaten vor.<sup>348</sup> Sie bilden das Sozialkapital ab, das die Verbindung zu der institutionellen Ebene schafft. Darunter fallen sowohl objektive Indikatoren wie die Arbeitslosigkeit, die Selbstmordrate oder die Lebenserwartung als auch subjektive Indikatoren wie das Wohlbefinden. Auf der Ebene von Staaten werden für die Sozialberichterstattung vier Indikator-Bereiche mit insgesamt 15 Indikatoren definiert. Dazu zählen die Armutgefährdungsquote, die Bruttoausgaben für Sozialhilfe, die Anzahl an Schulabbrechern oder die Erwerbslosenquote. Der Vertrag von Amsterdam stellt in dem Zusammenhang die herausragende Rolle der Beschäftigungsniveaus zum sozialen Fortschritt heraus.<sup>349</sup>

<sup>337</sup> von Hauff und Kleine 2009, S. 20

<sup>338</sup> Boms 2008, S. 94

<sup>339</sup> Blazejczak et al. 2000, S. 72; Brandl und Hildebrandt 2002, S. 27

<sup>340</sup> u. a. von Hauff und Kleine 2009, S. 21f.; Dyllick und Hockerts 2002, S. 134; Langer 2011, S. 11ff.; Schulz et al. 2001, S. 374f.; Hediger 1999, S. 1123ff.

<sup>341</sup> Mohr 1997, S. 13; Dyllick und Hockerts 2002, S. 134

<sup>342</sup> Putnam 1995, S. 664f.; Coleman 1994, S. 300ff.; Coleman 1988, S. 98; Bourdieu 1983, S. 190ff.

<sup>343</sup> Adam und Roncevic 2005, S. 216

<sup>344</sup> Empacher und Wehling 2002, S. 29ff.

<sup>345</sup> Putnam und Goss 2001, S. 28f.

<sup>346</sup> Woolcock 1998, S. 187; siehe auch Healy et al. 2001, S. 42ff.

<sup>347</sup> Langer 2011, S. 14

<sup>348</sup> OECD 2014, S. 85ff.

<sup>349</sup> Vertrag von Amsterdam, Art. 1 Abs. 5

Auf betriebswirtschaftlicher Ebene werden wiederum andere Indikatoren herangezogen. Sie gehen auf das brückenbildende Sozialkapital ein. Unternehmen haben gesellschaftliche Verantwortung, auch *corporate social responsibility* genannt.<sup>350</sup> Gesellschaftlich nachhaltige Unternehmen erhöhen den Mehrwert für die Gemeinden, indem sie zur Erhöhung des Humankapitals sowie zur Förderung des gesellschaftlichen Kapitals dieser Gemeinden beitragen.<sup>351</sup> Aus diesem Verständnis wird das Verkürzungsmerkmal der territorialen Bereiche auf der betriebswirtschaftlichen Aggregationsebene auf Gemeinden bzw. den Einzugsbereich des Unternehmens definiert. Weiterhin verwalten gesellschaftlich nachhaltige Unternehmen das soziale Kapital in einer Weise, sodass die Beweggründe nachvollziehbar sind und mit dem Wertesystem der Gesellschaft übereinstimmen.<sup>352</sup> Somit wird zwischen einer internen gesellschaftlichen Verantwortung bezogen auf das Humankapital und einer Externen bezogen auf das Sozialkapital unterschieden.<sup>353</sup> SCHWERK gibt einen Überblick verschiedener Methoden der Bewertung der sozialen Nachhaltigkeit von Unternehmen.<sup>354</sup>

Die am weitesten verbreitete Methodik ist die Berichterstattung nach der GLOBAL REPORTING INITIATIVE (GRI).<sup>355</sup> Es werden Indikatoren zu insgesamt zehn Themenfeldern vorgeschlagen.<sup>356</sup> Die Soziosphäre betreffend werden Indikatoren auf folgende Felder verkürzt:

- Produktverantwortung mit neun Indikatoren zu den Aspekten:<sup>357</sup>
  - Kundengesundheit und -sicherheit
  - Kennzeichnung von Produkten und Dienstleistungen
  - Werbung
  - Schutz der Kundendaten
  - Einhaltung von Gesetzesvorschriften
- Arbeitspraktiken und menschenwürdige Beschäftigung mit vierzehn Indikatoren zu den Aspekten:<sup>358</sup>
  - Beschäftigung
  - Arbeitnehmer-Arbeitgeber-Verhältnis
  - Arbeitsschutz
  - Aus- und Weiterbildung
  - Vielfalt und Chancengleichheit
- Menschenrechte mit neun Indikatoren zu den Aspekten:<sup>359</sup>
  - Investitions- und Beschaffungspraktiken
  - Gleichbehandlung

<sup>350</sup> Hardke 2010, S. 18f.; Claussen 2012, S. 155ff.; Pommerening 2005, S. 27

<sup>351</sup> Dyllick und Hockerts 2002, S. 134

<sup>352</sup> Dyllick und Hockerts 2002, S. 134

<sup>353</sup> Europäische Kommission, Generaldirektion Beschäftigung und Soziales, Referat EMPL/D.1 2001, S. 9ff.

<sup>354</sup> Schwerk 2012, S. 342ff.

<sup>355</sup> Schwerk 2012, S. 342; Müller 2012, S. 84

<sup>356</sup> Global Reporting Initiative 2006, S. 26ff.

<sup>357</sup> Global Reporting Initiative 2006, S. 36

<sup>358</sup> Global Reporting Initiative 2006, S. 31

<sup>359</sup> Global Reporting Initiative 2006, S. 33

- Vereinigungsfreiheit und Recht auf Kollektivverhandlungen
- Kinderarbeit
- Zwangs- und Pflichtarbeit
- Sicherheitspraktiken
- Recht der Ureinwohner
- Gesellschaft mit acht Indikatoren zu den Aspekten:<sup>360</sup>
  - Gemeinwesen
  - Korruption
  - Politik
  - Wettbewerbswidriges Verhalten
  - Einhaltung der Gesetze

Jedoch stehen nicht alle Aspekte mit den durch die Produktentwicklung antizipierbaren und damit beeinflussbaren unabhängigen oder abhängigen Eigenschaften eines zu entwickelnden Produktes nach Abschnitt 2.1.3 in Verbindung.<sup>361</sup> Ob die Unternehmensleitung des produktentwicklungsnahen Unternehmens oder eines Zulieferers korrupt agiert, ob die Zulieferer Kinder als Arbeitskräfte einsetzen<sup>362</sup> oder ob Kundendaten geschützt werden, sind weder mit den unabhängigen noch abhängigen Produkteigenschaften in Verbindung zu bringen.<sup>363</sup> Zudem sind die Maßstäbe der Indikatoren gesellschafts- und damit territorialspezifisch. Beispielsweise wird in der Ersten Welt Kinderarbeit als sozial unverträglich angesehen, während viele Familien der Dritten Welt durch das Einkommen aus der Kinderarbeit ihre Grundbedürfnisse decken.<sup>364</sup> Weiterhin liegt es im Aufgabenbereich des Einkaufes, unter Berücksichtigung herrschender Unternehmenskodexe, Lieferanten nach Zertifizierung, beispielsweise nach Social Accountability 8000<sup>365</sup>, auszuwählen.<sup>366</sup> Für das zu entwickelnde Produkt entsprechen die Sicherheitsanforderungen für die Produktion und Nutzung den klassischen Anforderungen nach Abschnitt 2.1. Somit bleibt aus Sicht der GRI die Beschäftigung aus dem Themenfeld *Arbeitspraktiken und menschenwürdige Beschäftigung* als möglicher

<sup>360</sup> Global Reporting Initiative 2006, S. 35

<sup>361</sup> Hierbei wird eine in Deutschland als territorial abgegrenzte Gesellschaft stattfindende Produktentwicklung vorausgesetzt.

<sup>362</sup> In den Medien ist der Fall „Kölner Heumarkt“ diskutiert worden. Laut WDR/SWR/ARD-alpha 2015 2008 sind die verlegten Pflastersteine von Kindern in Indien geklopft worden, obwohl nach Roters 2008 eine Unesco-Zertifizierung des Lieferanten vorgelegen hat und sowohl die Stadt Köln als Planer als auch der Verleger des Pflasters als Bearbeiter eine Gewissenserklärung abgegeben haben.

<sup>363</sup> Im Produktentwicklungsprozess werden Entscheidung aufgrund von Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt getroffen, wobei nicht alle Anforderungen durch die Produktentwicklung erfüllt werden können. Die Wahl für oder gegen einen Roh- oder Werkstoff werden i. d. R. auf Grundlage der Erfüllung der Anforderungen getroffen. Dabei obliegt die Auswahl der Zulieferer bzw. der Beschaffungsquellen nicht der Produktentwicklung. Ein und derselbe Roh- bzw. Werkstoff unterschiedlicher Zulieferer kann Unterschiede in der indizierten sozialen Nachhaltigkeit aufweisen. Beispielsweise werden nach Bleischwitz und Guesnet 2012, S. 82ff. Rohstoffe auf Grund ihres Herkunftslandes zu Konfliktrohstoffen. Der sog. *Dodd-Frank Act* beschränkt sich nach Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act, SEC. 1502 bei der Definition von Konfliktrohstoffen auf Rohstoffe, die in oder durch die Demokratische Republik Kongo und Anrainerstaaten gewonnen oder gehandelt werden.

<sup>364</sup> Brugger 2010, S. 184; an dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass der Autor, trotz dieses Literaturverweises, Kinderarbeit nicht rechtfertigt.

<sup>365</sup> Social Accountability International 2014, S. 2ff.

<sup>366</sup> Koplin 2006, S. 77ff.

Indikatorwert der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit eines zu entwickelnden Produktes übrig.

HANUSCH definiert die gesellschaftliche Verantwortung der Produktentwicklung über die Kriterien:<sup>367</sup>

- Belastung des Umfeldes durch Lärm, Dämpfe, Staub, Hitze, Chemikalien oder Abwasser
- Umgang mit kritischen Produkten, Stoffen und Substanzen
- Einsatz oder Förderung ethisch fragwürdiger Technologien oder Produkte mit erhöhtem Risiko für die Menschheit

Die ersten beiden Kriterien sind nach Abschnitt 2.2.1 der Ökosphäre zuzuordnen und werden durch entsprechende Wirkkategorien abgedeckt. HANUSCH definiert das Verständnis von ethisch fragwürdigen Technologien oder von Produkten mit erhöhtem Risiko für die Menschheit nicht. TISCHNER UND CHARTER verstehen unter Ethik im Zusammenhang mit der Entwicklung gesellschaftlich nachhaltiger Produkte das Fremdbild eines Unternehmens bzw. die Arbeitsbedingungen im Unternehmen und entlang der Wertschöpfungskette.<sup>368</sup> Ein Beispiel für die Entwicklung fragwürdiger Technologien stellt das Manhattan-Projekt der USA zum Bau der ersten Atombombe dar.<sup>369</sup> Das letzte Kriterium tangiert das persönliche ethische Selbstverständnis der an der Produktentwicklung beteiligten Personen als Individuen. Ihnen unterliegt die Entscheidung, inwieweit sie für ein Unternehmen arbeiten, welches fragwürdige Technologien einsetzt oder Produkte mit erhöhtem Risiko für die Menschheit vertreibt. Zudem haben PAHL ET AL. ethische Grundregeln als Randbedingungen für methodische Leitlinien zur Entwicklung technischer Produkte als Verkürzung vorausgesetzt.<sup>370</sup>

Aus Sicht von Unternehmen wird primär die Sicherung von Arbeitsplätzen mit ihrer gesellschaftlichen Verantwortung assoziiert.<sup>371</sup> VDI 4070 Blatt 1 empfiehlt u. a. die Mitarbeiterzahl eines Unternehmens, die Fluktuationsquote und den Anteil an Auszubildenden als Indikatoren für ein gesellschaftlich nachhaltiges Unternehmen heranzuziehen.<sup>372</sup>

Kunden assoziieren nach BIESALSKI & COMPANY die gesellschaftliche Nachhaltigkeit eines Unternehmens mit der Fairness als Arbeitgeber, der Schaffung und Erhaltung von Arbeitsplätzen, dem kreativen Engagement und dem fairen Umgang mit Reklamationen.<sup>373</sup>

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.1 getroffenen Randbedingung der Erfüllung klassischer Anforderungen an das Produkt und des Verständnisses der Betriebswirt-

---

<sup>367</sup> Hanusch 2011, S. 100

<sup>368</sup> Tischner und Charter 2001, S. 129

<sup>369</sup> Lause 2012

<sup>370</sup> Pahl et al. 2007, S. 57

<sup>371</sup> Riess und Peters 2006, S. 6; VDI 4070 Blatt 1, S. 16

<sup>372</sup> VDI 4070 Blatt 1, S. 16

<sup>373</sup> Biesalski & Company 2014, S. 7

schaft von ihrer gesellschaftlichen Verantwortung, liegt ausschließlich die Beschäftigung als Indikatorwert für eine gesellschaftliche Nachhaltigkeit im Einflussbereich der Produktentwicklung.<sup>374</sup> In verschiedenen Veröffentlichungen wird in der Beschäftigung einer der wichtigsten Aspekte der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit gesehen.<sup>375</sup> HILDEBERG ET AL. stellen besonders die Rolle der Beschäftigung als „[...] essentielle sozio-ökonomische Variable [...]“ heraus.<sup>376</sup> Nicht zuletzt sind die Stabilität und der Wohlstand einer Gesellschaft von dem Beschäftigungsniveau abhängig.<sup>377</sup>

Aus Sicht der Kunden von Konsumgütern sind in der Literatur bezüglich des Sozialkapitals als bindendes oder brückenbildendes Element zwischen Menschen keine Indikatoren zu finden. Für diese Arbeit wird die Annahme<sup>378</sup> vorausgesetzt, dass ein Konsumgut über die Interaktionsfähigkeit des Nutzers mit ähnlichen Personen auf die gesellschaftliche Nachhaltigkeit Einfluss nimmt. Ein möglicher Indikator ist die steigenden Verkaufszahlen von Servicerobotern für den Haushalt<sup>379</sup>. Sie verringern die an die Prozessen im Haushalt gebundene persönliche Leistung des Nutzenden und führen zu einem Zeitgewinn in Bezug auf die Interaktionsmöglichkeiten des Nutzenden mit ähnlichen Menschen. Eine ähnliche Annahme<sup>380</sup> wird für die Nutzung von Investitionsgütern vorausgesetzt. Ein Investitionsgut beeinflusst die gesellschaftliche Nachhaltigkeit über die Interaktionsmöglichkeit des Anwendenden mit von ihm verschiedenen Menschen. Beispielsweise ist die Anordnung der Arbeitenden bzw. der Anwendenden innerhalb eines Transformationssystems entscheidend für die „[...] Realisierung von Kontaktbedürfnis und Geselligkeitsstreben [...]“<sup>381</sup>.

Somit werden für diese Arbeit die für die Transformationssysteme des Produktlebenslaufes nötige personengebundene Leistungen als gesellschaftlicher Nachhaltigkeitsindikatorwert herangezogen. Dies ist in den sozialwissenschaftlichen Vorarbeiten und den in der Literatur vorhandenen Synthesemöglichkeiten der Indikatorwerte einer gesellschaftlichen Nachhaltigkeit eines zu entwickelnden Produktes begründet. Die personengebundene Leistung entspricht während der Fabrikationsprozesse der Anzahl der Beschäftigten, die für die Transformation der Materialien benötigt werden. In der Nutzung des zu entwickelnden Produktes wird die personengebundene Leistung über die Nutzungszeit indiziert.

<sup>374</sup> Die Beschäftigung als ein Indikatorwert der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit bleibt bei Nachhaltigkeitsbetrachtungen i. d. R. im Hintergrund. Hildebrandt, S. 12ff. diskutiert die Gründe dafür. Hildebrandt 2003, S. 387ff. sieht in der Beschäftigung einen der zentralen Aspekte einer nachhaltigen Entwicklung.

<sup>375</sup> Zukunftskommission der Friedrich-Ebert-Stiftung 1998, S. 270; Spangenberg 2003, S. 658; Chan und Lee 2007, S. 246; Omann und Spangenberg 2002, S. 2; Hildebrandt 2003, S. 387ff.; Brandl und Hildebrandt 2002, S. 27; Radermacher 1998, S. 8ff.

<sup>376</sup> Hinterberg et. al. 1998, S. 4

<sup>377</sup> Europäische Kommission, Generaldirektion Beschäftigung und Soziales, Referat EMPL/D.1 2001, S. 13

<sup>378</sup> Die Annahme basiert auf dem Dreiebenenmodell des Sozialkapitals nach Putnam bzw. Wollcock und wird für diese Arbeit getroffen, jedoch nicht verifiziert. Sie wird im Laufe der Arbeit aufgegriffen aber aus Gründen der fehlenden sozialwissenschaftlichen Vorarbeiten nicht für eine Nachhaltigkeitsbilanzierung verwendet.

<sup>379</sup> The International Federation of Robotics 2014, S. 24

<sup>380</sup> a. a. O. Fn. 378.

<sup>381</sup> Ulich et al. 1973, S. 45

Nach dem Modell der bindenden Sozialkapitalebene der Soziosphäre hat jede Inanspruchnahme personengebundener Leistungen für technische Prozesse negative Wirkung auf die Soziosphäre über das „sinkende“ Sozialkapital aufgrund der daraus folgenden Abnahme der Interaktionsmöglichkeiten mit der Familie. Auf der anderen Seite bildet der Abruf personengebundener Leistung in Form von Beschäftigung die Voraussetzung eines gesellschaftlich nachhaltigen Zustandes. Die Beschäftigten eines Fabrikationsprozesses und der Nutzende entsprechen nach Abschnitt 2.1.1 dem Operator bzw. dem Anwendenden innerhalb des Transformationssystemes.

Für diese Arbeit wird die Soziosphäre um eine volkswirtschaftliche Betrachtung auf der verbindenden Ebene nach WOOLCOCK verkürzt. Die partialen Produktmodelle der Produktentwicklung ermöglichen z. Z. kein Antizipieren der Interaktion zwischen Menschen und staatlichen Institutionen über abhängige oder unabhängige Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes.<sup>382</sup>

### 2.2.2 Beeinflussbarkeit und Antizipierbarkeit der Nachhaltigkeit

Nach dem Modell der GPPe wird der Produktentwicklungsprozess unter ständiger Berücksichtigung des Produktlebenslaufs durchgeführt. Entscheidungen, die durch die Produktentwicklung bzgl. der Konkretisierung des zu entwickelnden Produkts bzw. Teilen des zu entwickelnden Produkts getroffen werden, beeinflussen die Transformationssysteme des Produktlebenslaufs. Eine Schwierigkeit stellt der ausschließliche Fokus der Produktentwicklung auf die Funktionserfüllung während des Teilprozesses des Konzipierens dar. Auch danach wird in der klassischen Produktentwicklung v. a. nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten konkretisiert. Eine prozessuale Betrachtung zum Antizipieren und Beeinflussen der Lebenslaufprozesse ist in den bekannten Entwicklungsmethodiken nicht vorgesehen (vgl. Fußnote (Fn.) 202). Ansatzpunkte nachhaltige Produkte zu entwickeln, stellen u. a. die Schritte der Auswahl und Bewertung von Varianten dar, die in den einzelnen Arbeitsschritten synthetisiert werden. An diesen Stellen kann durch Vergleiche unterschiedlicher Varianten des zu entwickelnden Produktes anhand antizipierter Lebenslaufprozesse Einfluss auf das Erreichen eines nachhaltigen Zustandes genommen werden.

Während des Arbeitsschrittes **Klären der Aufgabenstellung** ist das Antizipieren der Folgen der festgelegten Anforderungen auf die Nachhaltigkeit des zu entwickelnden Produktes nach Abschnitt 2.1.3 nicht möglich.<sup>383</sup> Anforderungen werden festgelegt (vgl. Abschnitt 2.1). In der Anforderungsliste werden nicht nur funktionale, sondern auch direkt oder indirekt ökologische, ökonomische und gesellschaftliche Aspekte des zu entwickelnden Produktes festgelegt. BIRKHOFER ET AL. und TISCHNER UND DIETZ erweitern die Produktentwicklung beispielsweise auf eine Methodik der *ökologischen*

<sup>382</sup> Wenn von Produkten die Rede ist, sind technische Systeme nach Kapitel 2.1 gemeint. Neue Technologien wie beispielsweise der elektronische Personalausweis erweitern die Interaktionsmöglichkeiten bzw. die Art der Interaktion zwischen den Menschen und den staatlichen Institutionen.

<sup>383</sup> Nach Stechert 2010, S. 18 ist nicht mal eine Widerspruchsfreiheit der Anforderungen untereinander analysierbar geschweige denn zu gewährleisten.

*Produktentwicklung*.<sup>384</sup> Durch die Erweiterung des Arbeitsschrittes *Klären der Aufgabenstellung* um die ökologische Analyse eines Referenzproduktes werden ökologische Anforderungen synthetisiert. Ökonomische Anforderungen werden i. d. R. über einen Zielpreis durch den Käufermarkt vorgegeben.<sup>385</sup> Der Zielpreis als Summe des Zielgewinnes und den vom Markt erlaubten Kosten<sup>386</sup> wird durch die Kostenplanung im Vorfeld der Produktentwicklung festgelegt und als Forderung verstanden.<sup>387</sup> Gesellschaftliche Anforderungen an das Produkt werden zum einen implizit durch die in Abschnitt 2.1 erwähnten klassischen Anforderungen abgedeckt. Je nach herrschendem Unternehmenskodex können zum anderen Anforderungen hinsichtlich der Zertifizierung von Lieferanten, beispielsweise nach Social Accountability 8000<sup>388</sup>, festgelegt werden. Ein Antizipieren der Lebenslaufprozesse mit anschließender Synthese der Indikatoren und der Analyse der Wirkung der festgelegten Anforderungen auf die Dimensionen der Nachhaltigkeit ist auf Grundlage der Anforderungsliste nicht vorgesehen und wegen des Abstraktionsgrades des individualisierten Produktmodelles durch die Liste aus Merkmalen mit Ausprägungen auch nicht möglich. Es fehlen Partialmodelle, die die Anforderungen als Datenbasis in Informationen bezüglich der Nachhaltigkeit individualisieren. Beispielsweise können ökologische Anforderungen aus der Analyse eines Referenzproduktes in Wechselwirkungen mit anderen Anforderungen zu einem Kompensationseffekt führen,<sup>389</sup> der zu einem ökologisch weniger nachhaltigen Produkt führt. Durch Toleranzeinengungen und Garantiezusagen steigen die Fertigungskosten.<sup>390</sup> Durch die Erfüllung dieser Anforderungen kann gleichzeitig die Kundenzufriedenheit und damit deren Umsatz durch den Verkauf des Produktes gesteigert werden. Letztendlich erlaubt die lösungsneutrale Modellierung des Produktes über Merkmale und Ausprägungen die zur Analyse der Nachhaltigkeit vorgegebene prozessuale Betrachtung nicht. Somit ist es in der Produktentwicklung auf Basis von Anforderungen nicht möglich, die Wirkung des zu entwickelnden Produktes auf den nachhaltigen Zustand zu analysieren und hinsichtlich der Entwicklung eines nachhaltigeren Produktes zu beeinflussen.

Ein Antizipieren der Wirkung von Transformationssystemen des Produktlebenslaufes auf die Nachhaltigkeit ist während des Arbeitsschrittes **Konzipieren** ebenfalls nicht durchgängig möglich. Eine Analyse der Nachhaltigkeit des zu entwickelnden Produktes auf funktionaler Ebene auf Basis der erstellten Funktionsstruktur ist nicht möglich,<sup>391</sup> da das Antizipieren von Transformationssystemen des Produktlebenslaufes über die Quantifizierung der Stoffe, Energien und/oder Informationen zur Realisierung der Funktionen, wie durch die Ökobilanz nach Abschnitt 2.1.2 vorgeschrieben, nicht vorgesehen ist. Erst nach der weiteren Konkretisierung einzelner Teilfunktionen über

<sup>384</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 569ff.; Tischner und Dietz 2000, S. 39ff

<sup>385</sup> Gaiser und Kieninger 1993, S. 64; Horváth et al. 1993, S. 10

<sup>386</sup> Horváth et al. 1993, S. 10ff.

<sup>387</sup> Horváth et al. 1993, S. 3; Seidenschwarz 1993, S. 31ff.; nach VDI 2225 Blatt 1, S. 8f. wird der Richt- bzw. Wunsch- oder Zielpreis durch die Kalkulationsabteilung eines Unternehmens ermittelt.

<sup>388</sup> Social Accountability International 2014, S. 2ff.

<sup>389</sup> Rath 2014, S. 127f.

<sup>390</sup> Ehrlenspiel et al. 2013, S. 164ff.

<sup>391</sup> Seitz 2003, S. 64

physikalische Effekte ist eine Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten für den Einsatz in Form von Heuristiken und Erfahrungen oder Regeln möglich. Mögliche Merkmale sind beispielsweise das Leistungsgewicht bzw. die Leistungsdichte oder der Wirkungsgrad unterschiedlicher Aktorprinzipien für den Einsatzprozess.<sup>392</sup> Prozessuale Informationen in Form der Einsatzintensität oder Einsatzhäufigkeit liegen evtl. in Form von Anforderungen vor, sind aber in den Partialmodellen der physikalischen Effekte nicht berücksichtigbar. Durch die weitere Konkretisierung des physikalischen Effektes über die Geometrie- und Stoffeigenschaften ist eine erste Datenbasis für das Antizipieren der Wirkung des zu entwickelnden Produktes über Transformationssysteme auf die Nachhaltigkeit geschaffen.<sup>393</sup> Die benötigte Menge und benötigte Art der Materialien erlauben erste Schlüsse bezüglich der produktentwicklungsfernen Fabrikationsprozesse. Zur Synthese ökologischer Wirkungen schlagen PASTEWSKI und ROHN ET AL. während des Teilprozesses des Konzipierens den MIPS als vereinfachte ökologische Bewertungsmethode vor.<sup>394</sup> Die MIPS-Methode sieht in ihrer Vorgehensweise eine Analyse von Materialzuständen über Flüsse von Werkstoffen, Energien oder Transportstrecken vor.<sup>395</sup> Zum Vergleich von Stoffalternativen oder alternativen Geometrien verschiedener Wirkprinzipien reicht die Individualisierung des *Material-Inputs* der Konzeptvariante bzw. einzelner Teilfunktionen mit entsprechenden Wirkprinzipien aus.<sup>396</sup> OBERENDER schlägt für das Konzipieren bei der Betrachtung von Ressourceneffizienz die Methode *Kumulierter Energieaufwand (KEA)* vor.<sup>397</sup> Sowohl zur Durchführung des MIPS als auch des KEA wird eine Datenbasis in Form von Energie- und Materialmengen benötigt. Nach FELDHUSEN ET AL. werden während des Teilprozesses des Konzipierens ausschließlich die variablen Kosten zur Kostenfrüherkennung für das produktentwicklungsnahe Unternehmen antizipiert.<sup>398</sup> Methoden, die variable Kosten heranziehen, sind die Relativkostenkataloge und die anschließende Kostenschätzung über Materialkostenanteile nach VDI 2225.<sup>399</sup> Zum Antizipieren der Kosten für den Kunden kann auf Heuristiken und Erfahrungen zurückgegriffen werden. Eine Betrachtung gesellschaftlicher Aspekte ist auf Ebene der funktionellen wie auch prinzipiellen Betrachtung nicht möglich.<sup>400</sup>

Aus Sicht der Nachhaltigkeit sind insbesondere die Entscheidungen über unabhängige Eigenschaften und die daraus resultierenden abhängigen Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes während des Teilprozesses **Entwerfen** ausschlaggebend. Beispielsweise verknüpft VDI 2243 die Recyclingfähigkeit als abhängige Eigenschaft<sup>401</sup> mit den unabhängigen Gestalt- und Werkstoffeigenschaften.<sup>402</sup> Aus wirtschaftlicher Sicht werden während des Entwerfens die Herstell- bzw. Materialkosten als Indikator

<sup>392</sup> Zupan et al. 2002, S. 936ff. vergleichen unterschiedliche Aktorprinzipien hinsichtlich ihrer Eigenschaften.

<sup>393</sup> Pastewski 2009, S. 188f.

<sup>394</sup> Pastewski 2009, S. 188; Rohn et al. 2010, S. 20

<sup>395</sup> Ritthoff et al. 2002, S. 17ff.; Pant und Atik 2000, Abschnitt 3.3.4/S. 2ff.

<sup>396</sup> Ritthoff et al. 2002, S. 13

<sup>397</sup> VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt 2015 nach „Oberender VDI ZRE auf der Basis Anderl, Abele, Birkhofer (2005)“

<sup>398</sup> Feldhusen et al. 2014, S. F 9

<sup>399</sup> Feldhusen et al. 2014, S. F 9f.

<sup>400</sup> Kloepffer 2008, S. 89

<sup>401</sup> VDI 2223, S. 13

<sup>402</sup> VDI 2243, S. 7

für den wirtschaftlichen Erfolg eines zu entwickelnden Produktes für das produktentwicklungsnahe Unternehmen herangezogen.<sup>403</sup> Beispielsweise erfolgt nach VDI 2225 die vereinfachte Ermittlung von Materialeinzelkosten mittels Relativkosten über Bruttowerkstückkosten<sup>404, 405</sup> Nach EHRENSPIEL werden kostengünstige Lösungen durch die „Variation der Werkstoffeigenschaften [...], der Fertigungs-, Verbindungs- und Montageverfahren“<sup>406</sup> entworfen. Die Herstellkosten sind von den Gestalt- und Werkstoffeigenschaften abhängig.<sup>407</sup>

Somit ist ebenfalls ein Einfluss der Produktentwicklung während des Entwerfens durch die Entscheidung über unabhängige Eigenschaften auf die gesellschaftliche Dimension zu erwarten. Durch die Wahl des Werkstoffes, der Fertigungsverfahren und den dazu verfügbaren Operatoren antizipiert die Produktentwicklung die nötige personen-gebundene Leistung für die Fabrikations- und Nutzungsprozesse und kann diese Indikatorwerte der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit über die Variation der Materialien und Verfahren mit entsprechenden Operatoren beeinflussen.

Vor dem Teilprozesses **Ausarbeiten** sind alle Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes festgelegt. Über die Gebrauchsanweisung der Produkte kann die Produktentwicklung über alle Teilprozesse der Nutzung Einfluss auf das Nutzerverhalten nehmen.

### 2.3 Anforderungen an eine Methodik der Entwicklung nachhaltiger Produkte

Dieses Kapitel stützt die in Abschnitt 1 dargestellten Lücken des Standes der Forschung bezüglich der Entwicklung nachhaltiger Produkte in den drei Dimensionen. Das Partialmodell der GPPe ermöglicht der Produktentwicklung die Lebenslaufprozesse des zu entwickelnden Produktes zu antizipieren und zu beeinflussen. Doch den Zusammenhang zwischen den Lebenslaufprozessen und deren Wirkung auf die Nachhaltigkeit zu modellieren, ist nicht vorgesehen. Die logische und semantische Verbindung zwischen dem Produktlebenslauf und den Dimensionen der Nachhaltigkeit fehlt. Dafür sind in den jeweiligen Abschnitten Gründe erarbeitet worden.

Das Ergebnis des Abschnittes 2.1.2 zeigt das erschwerte Antizipieren und damit das Beeinflussen des Produktlebenslaufes. Die terminologischen Inkonsistenzen in Form von Widersprüchen zu Normen und Richtlinien des momentanen Entwicklungsstandes des Produktlebenslaufes begründet das erschwerte Antizipieren und damit das Beeinflussen des Produktlebenslaufes. Zur Abschätzung der Wirkung von Lebenslaufprozessen des zu entwickelnden Produktes ist ein an das allgemeine Verständnis unterschiedlicher Materialflüsse angepasstes Lebenslaufmodell erforderlich. Es erfüllt die

---

<sup>403</sup> VDI 2225 Blatt 3, S. 5

<sup>404</sup> VDI 2225 spricht ursprünglich von Bruttowerkstoffkosten. Da in dem Modell Abmessungen und Formen von Teilen berücksichtigt werden und keine Stoffeigenschaften, wird hier der Begriff Bruttowerkstückkosten verwendet.

<sup>405</sup> VDI 2225 Blatt 1, S. 3ff.

<sup>406</sup> Ehrlenspiel et al. 2013, S. 67

<sup>407</sup> VDI 2223, S. 13

Anforderungen aus normativ festgelegten Terminologien und ist widerspruchsfrei bezüglich der Materialflüsse und der systematisierten und zueinander abgegrenzten Transformationssysteme. Um den Anforderungen der Entwicklung nachhaltiger Produkte zu genügen, sensibilisiert es die Produktentwickelnden durch die Berücksichtigung paralleler Produktlebensläufe hinsichtlich ihrer Verantwortung. Zudem wird in Abschnitt 2.2.2 die Abhängigkeit der Qualität der Antizipierbarkeit bzw. Beeinflussbarkeit von den Transformationssystemen des Produktlebenslaufes durch die Produktentwicklung deutlich. Zum einen ist die Möglichkeit des Antizipierens und damit des Beeinflussens des Produktlebenslaufes vom Fortschritt der Produktentwicklung abhängig, entsprechend dem in Abschnitt 1 bereits diskutierten Dilemma der Produktentwicklung. Zum anderen sind die Möglichkeiten des Antizipierens und damit des Beeinflussens von dem organisatorischen und informatorischen Abstand zwischen der Produktentwicklung und den Transformationssystemen des Produktlebenslaufes abhängig. Produktentwicklungsnahe Transformationssysteme mit geringem organisatorischen bzw. informatorischen Abstand sind im Vergleich zu produktentwicklungsfernen adäquater zu antizipieren.

Zudem werden die logischen Defizite des Verständnisses der drei Dimensionen in Abschnitt 2.2 deutlich, was ein konstruktionsmethodisches Verständnis der Entwicklung nachhaltiger Produkte erschwert (vgl. Abschnitt 1). Kein Nachhaltigkeitsmodell bildet den Menschen und die von ihm verursachten Transformationssysteme der Technosphäre in einer Art ab, dass eine Wirkung von Transformationssystemen auf die Nachhaltigkeit aufgezeigt wird. Während die Ökosphäre sowohl unabhängig von Organisationseinheiten oder Anspruchsgruppen definiert und abgegrenzt, als auch die Analyse der ökologischen Nachhaltigkeit normativ über eine prozessuale Betrachtung vorgegeben ist, steht die Produktentwicklung bei dem Erreichen eines ökonomisch nachhaltigen Zustandes vor der Aufgabe, unterschiedlichste Interessensgruppen auf unterschiedlichen Aggregationsebenen zu berücksichtigen. Aus Sicht des produktentwicklungsnahen Unternehmens steht das Ziel der Minimalkosten bei vorgegebenen Stückpreisen im Fokus. Aus Sicht des Kunden eines Investitionsgutes als zu entwickelndes Produkt widerspricht das Bilanzdenken dem Erreichen eines ökonomisch nachhaltigen Zustandes einer Lebenszyklusbetrachtung. Bei Konsumgütern entscheidet oftmals der Kunde aufgrund der durch das Marketing erweckten (diffusen) Begeisterungsmerkmale und nicht rational aufgrund seiner Anforderungen und deren Erfüllung durch das Produkt. Die größten Lücken weist das Verständnis des gesellschaftlich nachhaltigen Zustandes auf. Zum einen geht aus der soziologischen Diskussion kein einheitliches und konsistentes Modell der Gesellschaft und der Definition eines gesellschaftlich nachhaltigen Zustandes hervor. Zum anderen unterscheiden sich die gesellschaftlichen Nachhaltigkeitsindikatoren zwischen der brückenbildenden, der bindenden und verbindenden Betrachtung der unterschiedlichen gesellschaftlichen Aggregationsebenen. Nach Abschnitt 2.2.1.3 hat sich aus der Diskussion des Standes der Forschung die nötige personengebundene Leistung während des antizipierten Transformationssystemes als ein möglicher Indikatorwert der Soziosphäre herausgehoben.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung einer an die Gegebenheiten der Produktentwicklung angepassten Methodik zur Abschätzung der Wirkung des zu entwickelnden Produktes auf die Nachhaltigkeit entlang des gesamten Produktlebenslaufes. Dabei werden Modelle und Vorgehen des Standes der Technik nach Abschnitt 2.1 und 2.1.3 verwendet. Bezüglich des fehlenden Daten-, Modell- und Methodenwissens liegt die Herausforderung in der Schnittmenge der Datenbasis mit den bestehenden Modellen und dem Vorgehen. Nach LINDEMANN erfolgt eine Auswahl der Methode anhand der verfügbaren Datenbasis, dem zum Lösen des Problemes verfügbaren Partialmodell und dem individualisierbaren Individualmodell.<sup>408</sup> Entsprechend ist eine Konsistenz hinsichtlich der Produktmodelle der Produktentwicklung und der Nachhaltigkeitsmodelle vorauszusetzen und für die Erfüllung Anforderung der Durchgängigkeit zwingend erforderlich. Der Produktentwicklung soll eine *tatsächliche Unterstützung* (vgl. Abschnitt 1.3) zur Verfügung gestellt werden, die eine Abschätzung der Wirkung des zu entwickelnden Produktes auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit erlaubt. Um dieses Ziel zu erreichen werden Anforderungen bzw. Ansprüche<sup>409</sup> bezüglich der Merkmale Konsistenz, Durchgängigkeit und Operationalisierbarkeit an die vorgeschlagenen Lösungen gestellt.

### **Konsistenz:**

Die Partialmodelle und des Vorgehens einzelner Methoden dürfen sich untereinander nicht widersprechen und müssen untereinander vereinbar sein (vgl. Abschnitt 1.2). Um diese Anforderung zu erfüllen, wird zunächst auf der Partialmodellebene die Konsistenz sichergestellt. Für die Dimensionen der Nachhaltigkeit gibt die Ökobilanz als eine „anerkannte Regel der Technik“<sup>410</sup> die zu verwendende Datenbasis und damit den Aufbau der Partialmodelle vor. Durch eine Adaption dieses Partialmodelles wird, sowohl eine redundante Erhebung von Daten ausgeschlossen und eine Ausnutzung von Datenkorrelationen unterstützt, als auch der Aufwand der Datenerhebung begrenzt. Zudem ist eine Konsistenz bezüglich des Vorgehens und dem über das jeweilige Partialmodell individualisierten Individualmodell sicherzustellen. Beispielsweise zeichnet sich durch das fehlende Verständnis der Soziosphäre nach Abschnitt 2.1.3 ein Defizit bezüglich der Wirkungsabschätzung der Transformationssysteme des Produktlebenslaufes anhand der personengebundenen Leistungen als gesellschaftlicher Indikatorwert ab. Eine Wirkungsabschätzung der Lebenslaufprozesse auf die Öko- und Ökosphäre ist somit unvereinbar mit der durch den Stand der Technik vorgegebenen Möglichkeit der Indizierung der Soziosphäre. Auf der Vorgehensebene wird ähnlich zu der Konsistenzsicherstellung auf Partialmodellebene vorangegangen. Ausgehend vom Vorgehen der Ökobilanz wird auf Grundlage der erarbeiteten Partialmodelle der

---

<sup>408</sup> Lindemann 2007, S. 58ff.

<sup>409</sup> Wenn von Anforderungen zum Erreichen eines Zieles, was nicht ein zu entwickelndes Produkt darstellt, gesprochen wird, sind nicht die Anforderungen entsprechend der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Methode der Anforderungsliste gemeint. Eine Individualisierung der Anforderungen an ein Forschungsvorhaben über eine Anforderungsliste ist nicht konsistent mit der Methode der Anforderungsliste, weil sich sowohl Datenbasis als auch die anschließende Nutzung der Anforderungsliste als Ergebnis der Methode unterscheiden.

<sup>410</sup> DIN EN 45020, S. 19

Öko-, Ökono- und Soziosphäre ein Vorgehen vorgeschlagen, das analog für sämtliche Partialmodelle der Nachhaltigkeitsdimensionen durchzuführen ist. Ist beispielsweise aufgrund der Datenlage eine Indizierung der Nachhaltigkeit einer Sphäre nicht möglich, wird auf die Indizierung der anderen verzichtet. Das ist in dem allgemeinen Verständnis der Gleichrangigkeit der Dimensionen einer nachhaltigen Entwicklung nach Abschnitt 1 begründet. Letztendlich ist die Konsistenz der übergeordneten Partialmodelle der GPPe als Vorgehensmodell, bestehend aus dem Partialmodell der Produktentwicklung mit den Produktmodellen nach Tabelle 2-1 und dem Produktlebenslauf mit dem Prozessmodell nach Bild 2-2, und der Nachhaltigkeit sicherzustellen. Hierfür ist die Unterscheidung zwischen den Analyse- und Syntheseschritten und dem Antizipieren und Beeinflussen des Produktlebenslaufes während der Produktentwicklung nach Abschnitt 2.1 zu berücksichtigen. Eng mit dem Konsistenzmerkmal ist die Berücksichtigung von Randbedingungen, Systemgrenzen und Verkürzungen verknüpft. Sämtliche Methoden dieser Arbeit sind auf die Aktionsparameter der Produktentwicklung ausgelegt. In diesem Abschnitt ist bereits auf die Folgen der Verkürzungen einzelner Dimensionen der Nachhaltigkeit auf die anderen Dimensionen bereits eingegangen worden – die fehlende Möglichkeit der Indizierung einer Dimension führt aus Gründen der Gleichrangigkeit zur Verkürzung um die anderen beiden Dimensionen. So führen fehlende Aktionsparameter der Produktentwicklung auf der verbindenden Ebene des Sozialkapitales zu der Verkürzung der volkswirtschaftlichen Aggregationsebene der Ökonosphäre. Eine weitere Randbedingung ist durch das Verständnis der Indikatoren der Soziosphäre über eine einheitliche normative Sozialstruktur festgelegt (vgl. Abschnitt 2.2.1.3). Entsprechend ist die Indizierung der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit über die in Abschnitt 2.2.1.3 vorgestellten Indikatoren ausschließlich für Gesellschaften konsistent, die ähnliche gesellschaftliche Merkmale<sup>411</sup> aufweisen, unter denen die Methoden entwickelt worden sind.<sup>412</sup> Beispielsweise ist der Nomadismus als Gesellschaftsform hinsichtlich seiner Indikatoren von westlichen Gesellschaftsformen zu unterscheiden.

### **Durchgängigkeit:**

Änderungen des zu entwickelnden Produktes, besonders grundlegender Art, werden mit dem Fortschritt der Produktentwicklung entsprechend dem Dilemma der Produktentwicklung aufwendiger. Bereits festgelegte Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes bedingen sich gegenseitig.<sup>413</sup> Somit muss die Methodik einer nachhaltigen

<sup>411</sup> zu Ähnlichkeit von Gesellschaften siehe Abschnitt 3.2.3

<sup>412</sup> Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 erwähnt, sind bei der Betrachtung von Methoden und den ihnen zugrunde gelegten Modellen stets die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, unter denen sie entwickelt worden sind, zu berücksichtigen. Dieser Sachverhalt gilt insbesondere für Methoden zur Indizierung der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit. Beispielsweise unterscheidet sich nach Pohl 2009, S. 125f. das Verständnis der Bedeutung des Begriffes *Ethik* und nach Müller 2001, S. 454 des Begriffes *Freiheit* in China von dem in westlichen Ländern. Zudem hat es nach Kaminski 1973, S. 36 Mitte der 70er Jahre kein chinesisches Wort für Menschenrechte gegeben. Nach Schmidt und Di Lorenzo 2012, S. n. b. sind "[...] Menschenrechte [...] der chinesischen Zivilisation bisher nicht inhärent" und nach Schmidt und Die Zeit 2015, S. n. b. „[...] eine westliche Erfindung“. Derartige kulturelle Unterschiede führen zu Inkonsistenzen bei der Indizierung von Ethik, vorhandener persönlicher Freiheit oder der Einhaltung von Menschenrecht durch die in Abschnitt 2.2.1.3 vorgestellten Methoden zur Indizierung der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit.

<sup>413</sup> Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 514

Produktentwicklung sowohl die horizontale als auch die vertikale Durchgängigkeit nach Abschnitt 1.2 erfüllen. Die Durchgängigkeit wird über den Aufbau der Partialmodelle erfüllt. Die Durchgängigkeit gewährleisten eine produktentwicklungsbegleitende Individualisierung der Partialmodelle bei sich ändernder Datenbasis aufgrund der fortschreitenden Konkretisierung des zu entwickelnden Produktes. Die Methodik erlaubt die Wirkungsabschätzung sowohl auf Wirkprinzip- bzw. Wirkstruktur- und Bauteilebene als auch auf sämtlichen Abstraktionsebenen des Prozessmodelles nach Abschnitt 2.1.1. Wie in Abschnitt 2.2.2 bereits festgestellt, ist eine Synthese von Nachhaltigkeitsindikatorwerten auf Basis antizipierter Lebenslaufprozesse mit anschließender Analyse auf den Ebenen der Anforderungen und der physikalischen Effekte nicht möglich.

### **Operationalisierung:**

Um die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik zu gewährleisten und die Erfüllung der Anforderungen an Konsistenz und Durchgängigkeit zu überprüfen, wird eine Operationalisierung vorgesehen. Eine Operationalisierung im konstruktionsmethodischen Kontext entspricht einer Überführung der *beabsichtigten Unterstützung* („*intended support*“) als ein konsistentes, durchgehendes und abstraktes auf Partialmodellen basierendes Vorgehen zu einer *tatsächlichen Unterstützung* („*actual support*“) in Form eines Hilfsmittels zur Durchführung der Methodik<sup>414</sup>. Durch die Entwicklung eines partiellen Datenmodelles<sup>415</sup> werden die Zusammenhänge zwischen den Transformationssystemen und Nachhaltigkeitsindikatorwerten erfasst. Dieses Partialmodell ermöglicht die Individualisierung<sup>416</sup> des Partialmodelles auf sämtlichen Abstraktionsebenen des Prozessmodelles (vgl. Abschnitt 2.1.1).

---

<sup>414</sup> Berger 2004, S. 180; als Hilfsmittel werden u. a. Rechneranwendungen verstanden.

<sup>415</sup> analog zum Verständnis des Produktdatenmodelles nach Speck 1998, S. 10

<sup>416</sup> Speck 1998, S. 10 spricht von dem Instanzieren eines Produktdatenmodelles zu einem Produktmodell.

### 3 Das Modell für die Entwicklung nachhaltiger Produkte

Wie bereits dargelegt, hat die Produktentwicklung die Möglichkeit über die unabhängigen Eigenschaften die virtuellen Transformationssysteme innerhalb des Produktlebenslaufes hinsichtlich der Nachhaltigkeit als abhängige Eigenschaft zu beeinflussen. Die Beeinflussung erfolgt nach einer Synthese bzw. Individualisierung des Produktmodelles mit einer anschließenden Analyse und kriterienbasierten Auswahl des Individualmodelles des Produktes auf den unterschiedlichen Konkretisierungsebenen. Durch die Beeinflussung des Produktlebenslaufes resultieren weitreichende Folgen auf andere Transformationssysteme innerhalb der Technosphäre und damit die Dimensionen bzw. die Sphären<sup>417</sup> der Nachhaltigkeit (vgl. Bild 3-1).

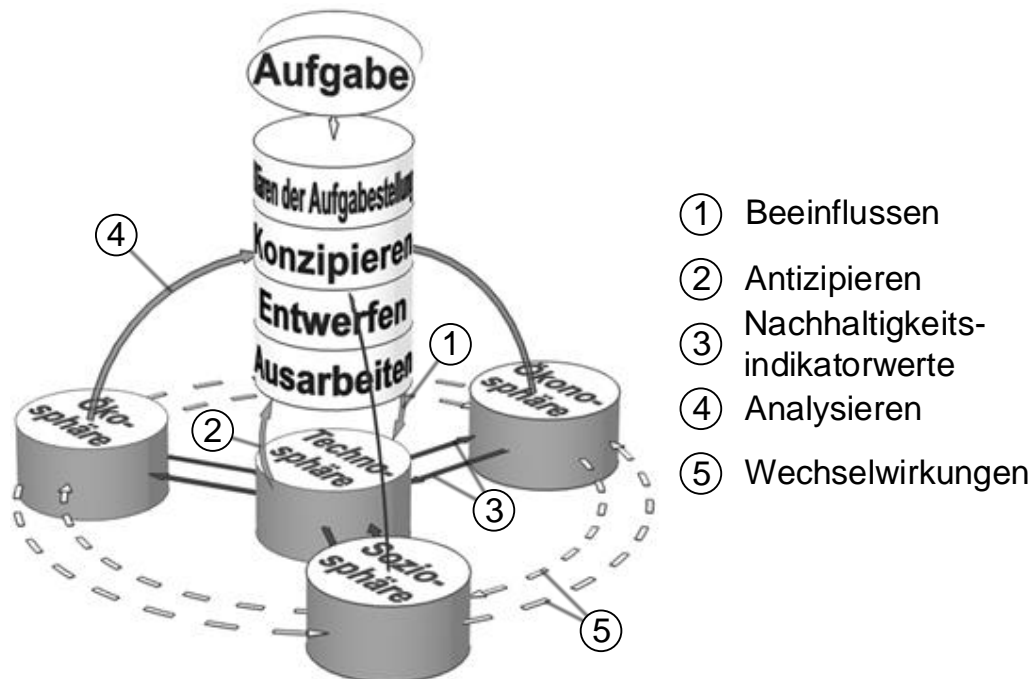


Bild 3-1: Das Partialmodell der Entwicklung nachhaltiger Produkte

Die Produktentwicklung antizipiert und beeinflusst konsistent zur GPPe die Prozesse der Technosphäre. Diese Prozesse wirken auf die Sphären der Nachhaltigkeit. Analog zu den Wirkungsindikatorwerten der Ökobilanz führen Nachhaltigkeitsindikatorwerte (vgl. Abschnitt 2.2.1.1), die als „Fluss“ über die Systemgrenze der Technosphäre zu verstehen sind, zu einer Wirkung in den Sphären durch die dort stattfindenden umweltmechanischen, finanzwirtschaftlichen und gesellschaftlichen Prozesse. Diese Wirkung

<sup>417</sup> Es wird die Terminologie der Sphären der Nachhaltigkeit den Dimensionen der Nachhaltigkeit bevorzugt, wobei die Sphären der Ökonomie, der Ökologie und der Gesellschaft Submodelle der Dimensionen darstellen. Eine Sphäre, sei es im Sinne der Mathematik als topologische Sphäre, im Sinne der Erdsphären oder im Sinne der Privatsphäre als gesellschaftliches Pendant zur Wirtschaftseinheit des Privathaushaltes, bilden die Subsysteme einzelner Dimensionen. Die Ökonosphäre kann durch die Aggregationsebenen der Wirtschaftseinheiten nach Abschnitt 2.2.1.2 in eine volkswirtschaftliche, betriebswirtschaftliche und privatwirtschaftliche (Sub-) Sphäre aufgeteilt werden. Die Soziosphäre wird nach Abschnitt 2.2.1.3 in die bindende, die brückenbildende und die verbindende (Sub-) Sphäre unterteilt. Die Ökosphäre, auch wenn Sphären im Partialmodell der Ökobilanz nicht modelliert werden – einzelne Wirkungskategorien können auf einzelne Sphären beschränkt sein – umfasst die Atmosphäre, die Hydrosphäre und die Lithosphäre. Die Technosphäre kann auf den Abstraktionsebenen des Prozessmodelles spezialisiert werden. Abhängig von dem Ziel der Nachhaltigkeitsbilanzierung und den verfügbaren Daten werden die Dimensionen der Nachhaltigkeit entsprechend durch die Sub-Sphären konkretisiert.

kann auf Basis der bereits individualisierten Nachhaltigkeitsindikatorwerte oder über die weitere Individualisierung der Nachhaltigkeitsindikatorwerte zu Nachhaltigkeitsindikatoren analysiert werden (konsistent zu Abschnitt 2.2.1.1). Die Beeinflussung durch abhängige Eigenschaften wird über die Folgen der Entscheidungen auf die einzelnen Sphären analysiert, um einen möglichst ganzheitlich nachhaltigen Zustand zu erreichen. Das Beeinflussen und Antizipieren der Technosphäre erfolgt konsistent zu der GPPe durch synthetisierte Informationsflüsse. Eine Beeinflussung der Sphären ist ausschließlich indirekt (abhängig) über die Transformationssysteme bzw. Material- und Energieflüsse<sup>418</sup> innerhalb des Produktlebenslaufes möglich.<sup>419</sup> Das bedeutet bezogen auf das Modellverständnis nach Abschnitt 1.2, dass die Entscheidungen der Produktentwicklung und die damit beeinflussbaren Nachhaltigkeitsindikatorwerte der Transformationssysteme des Produktlebenslaufes die Datenbasis der jeweiligen Partialmodelle der einzelnen Sphären bilden. Die Nachhaltigkeitsindikatorwerte führen zu einer Zustandsänderung der Ökosphäre durch die Umweltwirkung, der Ökonosphäre durch sich ändernde monetäre Flüsse und der Soziosphäre durch das von der personengebundenen Leistung abhängige Sozialkapital. Als Datenbasis werden die Größen, Kennzahlen oder Indikatoren definiert, die als variierte abhängige oder unabhängige Eigenschaften mit den Partialmodellen der Nachhaltigkeit in Verbindung stehen. Dadurch wird ihre Wirkung analysierbar. Somit wird der Verantwortungsbereich der Produktentwicklung konsistent zu der Ökobilanz im Vergleich zum Partialmodell der GPPe um sämtliche mit dem zu entwickelnden Produkt in Verbindung stehende Lebensläufe innerhalb der Technosphäre erweitert. Es werden diejenigen Transformationssysteme berücksichtigt, die Materialien und Energie für die Fabrikations- und Nutzungsprozesse des zu entwickelnden Produktes zur Verfügung stellen.

Aus den Abschnitten 2.1.2 und 2.2 geht hervor, dass die Techno-, Ökono- und Soziosphäre auf unterschiedlichen Aggregationsebenen betrachtet werden können. Die Technosphäre kann auf die Ebenen der produktentwicklungsnahen und -fernen Lebenslaufprozesse aggregiert werden. Diese Transformationssysteme können weiter auf die drei Abstraktionsebenen des Prozessmodells individualisiert werden. Aus Sicht der Produktentwicklung können je nach den Zielen der Nachhaltigkeitsbilanzierung die Wechselwirkungen zwischen Staaten, Unternehmen und/oder Nutzern mit dem zu entwickelnden Produkt betrachtet werden.<sup>420</sup> Es herrschen nicht nur Wechselwirkungen

---

<sup>418</sup> Hier werden produktentwicklungsspezifische Informationsflüsse bewusst ausgeklammert. Während der Produktentwicklung synthetisierte Informationen wie Anforderungen, technische Zeichnungen, Stücklisten usw. haben keinen Einfluss auf die Nachhaltigkeitssphären. Erst ihre weitere Individualisierung in Transformationssysteme der Technosphäre durch das Antizipieren führt über Material- und Energieflüsse zu einer Wirkung auf die Nachhaltigkeit. Das Antizipieren der Wirkung von nach Außen getragenen Informationen auf die Ökonosphäre des produktentwicklungsnahen oder der -fernen Unternehmen bzw. der Soziosphäre, bspw. durch Produktankündigungen, liegt im Aufgabenbereich des Marketings.

<sup>419</sup> An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass es sich bei dem in der Produktentwicklung verfügbaren Produktlebenslauf um ein Partialmodell zur Modellierung des zukünftig möglichen virtuellen Produktlebenslaufes des zu entwickelnden Produktes handelt (siehe Abschnitt 2.1.2). Ein direktes Einwirken der Produktentwicklung auf die real ablaufenden Produktlebensläufe, die Umweltmechanismen, die gesellschaftlichen Prozesse oder die Verrechnung von Nominalgüterflüssen ist i. d. R. nicht möglich.

<sup>420</sup> von Hauff nennt weitere mögliche Akteure und Aggregationsebenen wie die Politik, Haushalte und Verbänden (Abschnitt 2.2.1.1)

zwischen den Sphären innerhalb der betrachteten Aggregationsebene, sondern auch ebenenübergreifend. Beispielsweise existieren Wechselwirkungen zwischen der unternehmerischen und der kundenseitigen Aggregationsebene der Ökonosphäre über Nominalgüterflüsse bzw. Gehälter. Aus Abschnitt 2.1.3 resultiert eine weitere Abhängigkeit der zu verwendenden aggregierten Partialmodelle von dem jeweiligen Teilprozess der Produktentwicklung. Die Wahl der Aggregationen und Systemgrenzen bzw. der Partialmodelle für die Sphären ist somit abhängig von dem Ziel der Nachhaltigkeitsuntersuchung und dem Stand der Produktentwicklung. Aufgrund der in Abschnitt 2.2.1.2 und 2.2.1.3 hergeleiteten Randbedingungen wird im Weiteren die Betrachtung der Nachhaltigkeit auf die Ebene der Kunden bzw. des Nutzenden<sup>421</sup> und des Unternehmens aus Sicht der Produktentwicklung mit den jeweils stattfindenden Transformationssystemen beschränkt. Zudem werden die Wechselwirkungen zwischen den Sphären der Nachhaltigkeit verkürzt. Das liegt zum einen an den momentan herrschenden Lücken im Verständnis der Verschränkung und Wechselwirkungen der Sphären der Nachhaltigkeit in der Wissenschaft.<sup>422</sup> Zum anderen fehlt ein wissenschaftlicher Konsens bezüglich der terminologischen Erfassung und des logischen Verständnisses vorhandener Zusammenhänge und Wechselwirkungen innerhalb des Nachhaltigkeitsmodelles.<sup>423</sup> Einigkeit herrscht über das Vorhandensein von Verschränkungen der Dimensionen und Wechselwirkungen.<sup>424</sup>

Im Folgenden wird näher auf das Partialmodell der Nachhaltigkeit als Teil des Partialmodelles der Entwicklung nachhaltiger Produkte eingegangen. Dabei wird konsistent zu der Ökobilanz eine prozessuale Betrachtung durchgeführt. Ausgehend vom Partialmodell der Technosphäre werden die Wechselwirkungen der Technosphäre mit den Nachhaltigkeitssphären verdeutlicht. Die Partialmodelle der Produktentwicklung entsprechen den Ausführungen in Kapitel 2.1.

### 3.1 Das Partialmodell der Technosphäre

Bei der Entwicklung nachhaltiger Produkte wird grundsätzlich der Ansatz des Lebenslaufdenkens zugrunde gelegt.<sup>425</sup> Wie in Abschnitt 2.1.2 bereits dargelegt, herrschen Unklarheiten bezüglich des Verständnisses des Produktlebenslaufes als Teil der Technosphäre und der ablaufenden Transformationssysteme, insbesondere der Materialkreisläufe. In dieser Arbeit wird von der klassischen Nomenklatur der Fabrikationsprozesse der Herstellung, der Produktion und des Recyclings abgesehen. Dies ist in der Konsistenz der Transformationssysteme mit den ihnen zugewiesenen Materialflüssen begründet. Kreislauf- und evtl. dazugehörige Aufbereitungs- bzw. Aufarbeitungspro-

<sup>421</sup> In Anlehnung an Reinicke 2004, S. 18f. werden Abnehmende aus Sicht der Unternehmen als Kunden und Anwendende aus Sicht der Produktentwicklung als Nutzende bezeichnet.

<sup>422</sup> Analog zu den Mechanismen innerhalb der Sphären nach Abschnitt 2.1 liegen die Mechanismen, die zu Wechselwirkungen zwischen den Sphären führen, nicht im Einflussbereich der Produktentwicklung.

<sup>423</sup> Franke 2002, S. 119; Gößling-Reisemann 2008, S. 264ff.

<sup>424</sup> Gößling-Reisemann 2008, S. 267; Gößling-Reisemann 2008, S. 264f.; Lutz-Kunisch 2008, S. 64

<sup>425</sup> Benoît und Mazijn 2009, S. 28

zesse werden über verfahrenstechnische Herstellungs- bzw. Fertigungsverfahren realisiert.<sup>426</sup> Sie unterscheiden sich i. d. R. nicht von den Transformationssystemen zur Herstellung von Werkstoffen bzw. Produktion von Produkten und können ihnen zugeordnet werden.<sup>427</sup> Sowohl bei dem Produktionsrücklaufrecycling, dem Altstoffrecycling als auch dem Recycling während des Produktgebrauches (vgl. Abschnitt 2.1.2) kommen Verfahren und Operatoren zur Transformation der Operanden zum Einsatz, die der Verfahrens- oder Fertigungstechnik zuzuordnen sind. Sie benötigen Faktoren, die in Arbeitskraft bzw. Humankapital (vgl. Abschnitt 2.2.1), Material und Betriebsmittel unterteilt werden.<sup>428</sup> Der Begriff Material fasst sämtliche Stoffe oder Gegenstände zusammen, die während des Produktlebenslaufes benötigt werden. Zu Materialien, die ein Bestandteil von Produkten werden, zählen Rohstoffe, Werkstoffe, Recyclate, Halbzeuge wie auch Rohteile, Fertigteile und Baugruppen.<sup>429</sup> Zu den Materialien zählen ebenfalls Stoffe, die kein Bestandteil eines Produktes werden wie Hilfs- und Betriebsstoffe.<sup>430</sup> Hilfs- und Betriebsstoffe wie auch Betriebsmittel besitzen eigene Produktlebensläufe innerhalb der Technosphäre, wobei ihr Einsatz in dem Produktlebenslauf des zu entwickelnden Produktes erfolgt. Innerhalb des Produktlebenslaufes wird in dieser Arbeit zudem zwischen Stoffen bzw. Gegenständen unterschieden. In der Chemie bestehen Gegenstände aus Stoffen.<sup>431</sup> Ein Stoff liegt in einer chemisch einheitlichen Form vor und ist gekennzeichnet durch charakteristische physikalische und chemische Eigenschaften.<sup>432</sup> Der Gesetzgeber unterscheidet ebenfalls zwischen Stoffen und Gegenständen. Abfälle sind Stoffe oder Gegenstände, derer sich der Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss.<sup>433</sup> In der Fertigungstechnik wird zwischen formlosen Stoffen und festen Körpern unterschieden.<sup>434</sup> Vom grundsätzlichen Verständnis unterscheiden sich nach Abschnitt 2.1.3 Stoffe durch ihre intensiven von Gegenständen mit ihren extensiven Eigenschaften.<sup>435</sup> Gegenstände sind fest und formbehaltet.<sup>436</sup> Das Adjektiv formbehaltet impliziert die Möglichkeit der Darstellung von Gegenständen nach den Normen der Reihe ISO 128<sup>437</sup> in einer technischen Zeichnung. In dieser Arbeit wird der Produktlebenslauf anhand der Unterscheidung zwischen Stoffen und Gegenständen differenziert und in Rohstoffgewinnungs-, verfahrenstechnische Verarbeitungs-<sup>438</sup>, fertigungstechnische Bearbeitungs-<sup>439</sup> sowie Nut-

---

<sup>426</sup> VDI 2243, S. 35

<sup>427</sup> Steinhilper 2009, S. 287

<sup>428</sup> Smith 1981, S. 33; Dangelmaier 2001, S. 41; Wöhe und Döring 2013, S. 81

<sup>429</sup> DIN EN ISO 14051, S. 12; VDI 3330, S. 3; DIN EN ISO 14040, S. 10

<sup>430</sup> DIN EN ISO 14051, S. 12; VDI 3330, S. 3; DIN EN ISO 14040, S. 10

<sup>431</sup> Busemann 1991, S. 570ff.

<sup>432</sup> Bibliographisches Institut GmbH 2014g

<sup>433</sup> KrWG, § 3 Absatz (1)

<sup>434</sup> DIN 8580, S. 4

<sup>435</sup> Busemann 1991, S. 570 f; DIN 8580, S. 6; DIN 2330, S. 6;

<sup>436</sup> DIN 8580, S. 4 spricht von „[...] geometrisch bestimmten festen Körpern [...]“.

<sup>437</sup> DIN ISO 128-1, S. 10

<sup>438</sup> Barthelmes 2013, S. 188

<sup>439</sup> DIN 8580, S. 6

zungs- und Beseitigungsprozesse unterteilt. Transporte verbinden die einzelnen Teilprozesse (vgl. Bild 3-2).<sup>440</sup> Eine geografische oder unternehmens- bzw. unternehmensstandortspezifische Modellierung der Teilprozesse ist nicht vorgesehen, da sich die Zustände unterschiedlicher Materialien innerhalb des Produktlebenslaufes nicht anhand von Unternehmensgrenzen bzw. Unternehmensstandorten systematisieren lassen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Die Modellierung erfolgt in Konsistenz mit der Ökobilanz über eine materialflussbasierte Betrachtung. Der Stoff, der aus der Rohstoffgewinnung hervorgeht, wird als Rohstoff bezeichnet. Die Rohstoffgewinnung unterscheidet sich von der Verarbeitung dahingehend, dass die ursprünglichen intensiven Eigenschaften des Stoffes aus den Lagern der Ökosphäre erhalten bleiben. Die Verarbeitung ändert die intensiven Eigenschaften sowohl der Rohstoffe als auch der Recyclate und bringt einen Werkstoff hervor. Die Bearbeitung zeichnet sich durch die Transformation des Werkstoffes zu einem Gegenstand und dessen Bearbeitung zu einem Fertigteil aus. Aus unterschiedlichen Fertigteilen, die Neu- wie auch Altteilen entsprechen können, werden mithilfe von Montageprozessen Baugruppen bzw. Produkte montiert. In der Nutzung wird das Produkt zur Erfüllung einer Funktion genutzt. Das Produkt kann sowohl aktiv als auch passiv Funktionen erfüllen.<sup>441</sup> Nach der Nutzung kann das Produkt, je nachdem ob für den geplanten Kreislaufprozess die intensiven oder extensiven Eigenschaften wichtig sind, einer Verarbeitung zur Verwertung als Stoff oder einer Bearbeitung zur Verwendung als Gegenstand zugeführt werden. Somit sind auch die Recyclingformen nach Abschnitt 2.1.2 eindeutig definierbar. Eine Verwertung liegt dann vor, wenn ein Stoff durch die Transformation der intensiven Eigenschaften verarbeitet wird. Eine Verwendung erfolgt durch die Transformation der extensiven Eigenschaften eines Gegenstandes in der Bearbeitung.<sup>442</sup> Einer Beseitigung werden ausschließlich Stoffe zugeführt, deren extensiven Eigenschaften innerhalb eines festen Aggregatzustandes für den Beseitigungsprozess nicht von Belang sind. Um den erweiterten Verantwortungsbereich der Produktentwicklung zu verdeutlichen, wird der Produktlebenslauf zur restlichen Technosphäre abgegrenzt (vgl. Abschnitt 2.1.2). Der Produktlebenslauf bildet ein Subsystem der Technosphäre ab. Die Transformationssysteme innerhalb des Produktlebenslaufes benötigen Materialien bzw. Energien, die nicht innerhalb des Lebenslaufes des zu entwickelnden Produktes abgebaut, hergestellt oder produziert bzw. erzeugt werden. Zudem werden Materialien aus dem betrachteten Produktlebenslauf in andere Produktlebensläufe der Technosphäre transportiert. Somit umschließt die Technosphäre sämtliche Rohstoffgewinnungs-, Fabrikations-,

---

<sup>440</sup> Schmidt-Bleek und Klütting 1993, S. 126

<sup>441</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 565

<sup>442</sup> Von den Präfixen wieder- und weiter- wird in dieser Arbeit abgesehen. Das liegt insbesondere an der fehlenden Nachverfolgbarkeit des Lebenslaufes eines Recyclates (dazu auch Abschnitt 3.1.2).

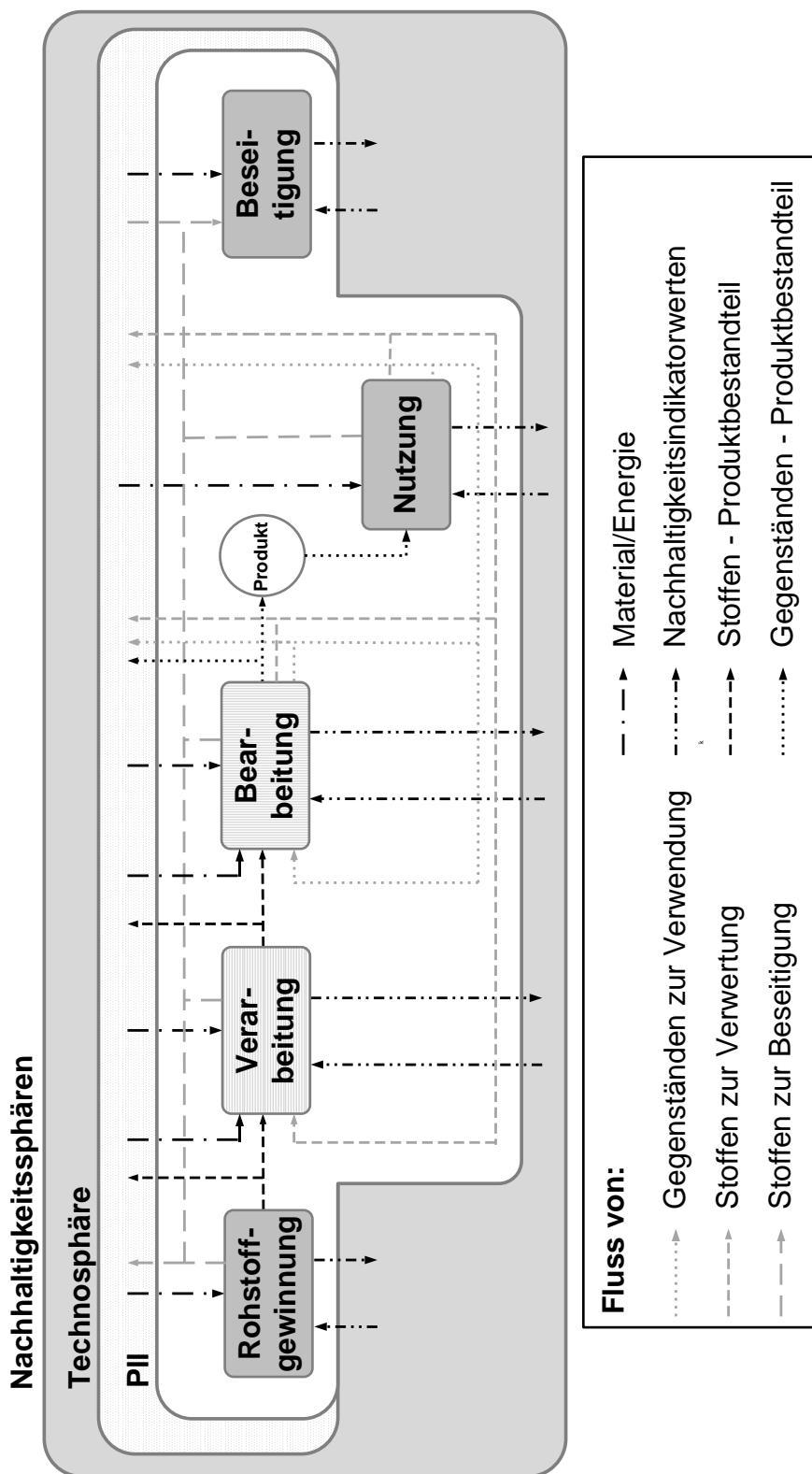


Bild 3-2: Das Partialmodell der Technosphäre<sup>443</sup>

<sup>443</sup> Für diese Arbeit gelten ab hier folgende Konventionen in Anlehnung an Züst 1998, S. 163: Material, welches Bestandteil des zu entwickelnden Produktes wird, wird von links, andere Materialien wie Betriebsstoffe, von oben dem Transformationssystem zugeführt. Nachhaltigkeitsindikatoren können sowohl Ein- wie auch Ausgänge eines Transformationssystemes sein und werden unterhalb eingetragen. Materialien als Ausgang eines Transformationssystemes, die Bestandteile des zu entwickelnden Produktes werden, verlassen es rechtsseitig, die Bestandteile anderer Produkte werden oder der Beseitigung zugeführt werden, verlassen es oberhalb; aus Gründen der Übersichtlichkeit werden Nebenflüsse, Anwendungen usw. nach Bild 2-2 nicht explizit aufgeführt, sie werden über die Nachhaltigkeitsindikatorwerte berücksichtigt.

Nutzungs- und Beseitigungsprozesse, die direkt oder indirekt über Material- oder Energieflüsse mit dem Lebenslauf des zu entwickelnden Produktes verknüpft sind. Die Technosphäre wird zu den Nachhaltigkeitssphären abgegrenzt und steht über die Nachhaltigkeitsindikatorwerte mit ihnen in Wechselwirkungen (vgl. Abschnitt 2.2.1.1 und Bild 3-2). Die Nachhaltigkeitsindikatorwerte erfassen analog zu den Wirkungsindikatorwerten der Ökobilanz die Größen bzw. Flüsse über die Systemgrenze der Technosphäre, die nach dem Übergang in die bzw. aus der Öko-, Ökono- und Soziosphäre eine Wirkung hervorrufen.

Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Transformationssysteme des Produktlebenslaufes eingegangen. Dabei wird die Abgrenzung über den Ein- und Ausgang der jeweiligen Materialien als Operanden durchgeführt.

### 3.1.1 Die Rohstoffgewinnung

Im ersten Transformationssystem des Produktlebenslaufes wird der Rohstoff gewonnen.<sup>444</sup> Die Rohstoffgewinnung hat zur Aufgabe Rohstoff abzubauen. Den Übergang des Elementarstoffes<sup>445</sup> aus der Ökosphäre zum Rohstoff in die Technosphäre stellt der Abbau dar (vgl. Abschnitt 2.1.2).<sup>446</sup> Die Verfahrenstechnik zeichnet sich durch eine Stoffänderung, die Fertigungstechnik durch eine Gestaltänderung aus.<sup>447</sup> Nach dem Abbau ist der Rohstoff weder verfahrenstechnisch verarbeitet noch fertigungstechnisch bearbeitet worden (vgl. Abschnitt 2.1.2). Die Rohstoffgewinnung erfolgt über *verfahrenstechnisch bzw. fertigungstechnisch ähnliche Verfahren*. Beispielsweise wird der Abbau von Eisenerz durch ein dem (Umfangs-)Fräsen fertigungstechnisch ähnliches Verfahren mithilfe eines Schaufelradbaggers als Operator realisiert. Nach DIN 8589 ist das Fräsen ein

„Spanen mit kreisförmiger, einem meist mehrzahnigen Werkzeug zugeordneter Schnittbewegung und mit senkrecht oder auch schräg zur Drehachse des Werkzeuges verlaufender Vorschubbewegung zur Erzeugung beliebiger Werkstückoberflächen.“<sup>448</sup>

Da es sich bei dem Erzvorkommen nicht um ein Werkstück handelt und das Fräsen von Spänen in der Fertigung einem ungewollten Neben-Stofffluss entspricht, wird in dieser Arbeit im Zusammenhang mit dem Rohstoffabbau durch Fräsen von fertigungstechnisch ähnlichen Verfahren gesprochen. *Verfahrenstechnisch ähnliche Verfahren* realisieren chemische, physikalische oder biologische<sup>449</sup> Prozesse zur Gewinnung von Rohstoffen, ohne die intensiven Eigenschaften des Rohstoffes zu transformieren. Beispiele für verfahrenstechnisch ähnliche Verfahren der Rohstoffgewinnung sind die hydraulische Frakturierung (*hydraulic fracturing* oder *Fracking*) oder das Sprengen. In

<sup>444</sup> Wäldele 2012, S. 36; Birkhofer et al. 2012

<sup>445</sup> Analog zur Definition des Elementarflusses nach DIN EN ISO 14040, S. 9

<sup>446</sup> Schneider 1992, S. 51; Schmidt-Bleek und Klütting 1993, S. 117; Läßle 2010, S. 13

<sup>447</sup> Schoner 2008, S. 16; Spur 2000, S. L4

<sup>448</sup> DIN 8589 Blatt 3, S. 3

<sup>449</sup> DIN EN ISO 10628, S. 4; bei Schoner 2008, S. 16 als Grundverfahren der Verfahrenstechnik bezeichnet und die mit den Hauptgruppen der Fertigungsverfahren der DIN 8580 vergleichbar sind.

Anlehnung an die Rohstoffdefinition ist ein Rohgegenstand ein fester Körper, der weder verfahrenstechnisch verarbeitet noch fertigungstechnisch bearbeitet worden ist, beispielsweise Stammholz oder Granit. Entsprechend sind Rohmaterialien terminologisch von Werkstoffen, die während der Verarbeitungsprozesse hergestellt werden, und von Recyclaten zu trennen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Der Rohstoff kann in Anlehnung an DIN 8580 nach der Gewinnung u. a. in flüssiger, plastischer, breiiger, körniger, pulveriger oder faseriger Form<sup>450</sup> vorliegen. Die abgebauten Rohstoffe werden sowohl an den betrachteten Produktlebenslauf als auch an andere in der Technosphäre stattfindende Lebensläufe transportiert (vgl. Bild 3 4).

### 3.1.2 Die Verarbeitungsprozesse

Verfahrenstechnische Verarbeitungsprozesse verändern Stoffe chemisch, physikalisch oder biologisch nach Art, Eigenschaft und Zusammensetzung.<sup>451</sup> Die Verarbeitungsprozesse entsprechen der Werkstoffherstellung des Produktlebenslaufes der GPPe. Analog zum Rohstoff ist der Werkstoff ein Stoff, der verfahrenstechnisch verarbeitet worden ist.<sup>452</sup> Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft wird von Aufbereitungsprozessen von Recyclaten zur Verwertung gesprochen (vgl. Abschnitt 2.1.2).<sup>453</sup> In diesem Teilprozess werden die Rohstoffe für die Bearbeitungsprozesse erstmalig bzw. die Recyclate zur Substitution von Rohstoffen erneut verarbeitet. I. d. R. bilden die Recyclate und der aus dem Rohstoff hergestellte Werkstoff aufgrund von Vermischungen einen homogenen Stoff. Nach der Vermischung ist eine separate Betrachtung des ursprünglichen Recyclatflusses und des Flusses verarbeiteter Rohstoffe nicht mehr möglich. Abhängig vom Rohstoff bzw. Recyclat, ihren Eigenschaften und dem herzustellenden Werkstoff werden unterschiedliche Verfahren genutzt. Werkstoffe werden sowohl zu dem betrachteten Produktlebenslauf als auch zu anderen in der Technosphäre stattfindenden Lebensläufen transportiert (vgl. Bild 3-2). Eine Verarbeitung von Rohgegenständen nach Abschnitt 3.1.2 ist i. d. R. nicht nötig. Sie besitzen bereits einen Zusammenhalt eines festen Aggregatzustandes mit den für die Bearbeitung und Nutzung geeigneten Eigenschaften.

### 3.1.3 Bearbeitungsprozesse

Die Bearbeitungsprozesse entsprechen der Produktion im Produktlebenslauf der GPPe. Die Produktentwicklung und Teile der Bearbeitungsprozesse sind nach der GPPe einer Organisationseinheit zugeordnet (vgl. Abschnitt 2.1). Die Produktion produziert aus Werkstoffen durch die Fertigung und die Montage Produkte für die Nutzung.<sup>454</sup> Die Fertigung fasst Verfahren zur Gewinnung fester Körper (Gegenstände)

---

<sup>450</sup> Zustände in Anlehnung an DIN 8580, S. 8; die Zustände plastisch und breiig werden hier als mesomorphe Zustände – ein Zustand zwischen den Aggregatzuständen fest und flüssig – interpretiert.

<sup>451</sup> Barthelmes 2013, S. 188

<sup>452</sup> VDI 4800 Blatt 1, S. 5 versteht nach Kosmol et al. 2012, S. 27 einen Werkstoff als Rohstoff, da er unbearbeitet in die Produktion geleitet wird.

<sup>453</sup> VDI 2243, S. 35

<sup>454</sup> Westkämper 2006, S. 41

aus dem formlosen Zustand (Stoffen) und die geometrische und stoffliche Veränderung von Werkstücken zu Fertigteilen zusammen.<sup>455</sup> Mit dem Urformen eines festen Körpers aus dem formlosen Werkstoff durch Schaffen eines Zusammenhaltes treten erstmals Werkstückeigenschaften in Erscheinung (vgl. Abschnitt 3.1.2).<sup>456</sup> Die Transformation eines Werkstückes zu einem Fertigteil erfolgt durch Bearbeitungsprozesse, die durch Fertigungsverfahren realisiert werden.<sup>457</sup> In der Montage werden die Fertigteile zu Baugruppen und/oder Produkten unter Anwendung von Fügeverfahren bearbeitet und die Qualität durch Prüfungen gesichert.<sup>458</sup> Aus Sicht der Kreislaufprozesse entspricht die Bearbeitung von Gegenständen der Aufarbeitung zur Verwendung.<sup>459</sup> Im Gegensatz zu den Verarbeitungsprozessen aus Abschnitt 3.1.2 lassen sich die Operanden der Aufarbeitungsprozesse separat von denen der Neu-Produktion betrachten. I. d. R. werden bei der Aufarbeitung, die einem Teilprozess der Refabrikation entspricht, die Produktionsprozesse in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen. Die fertigungstechnische Aufarbeitung erfolgt nach einer Prüfung mit anschließender Demontage und erneuter Montage.<sup>460</sup> Konsistent zu Abschnitt 2.1.1 und zu der GPPe wird in Bild 3-2 das Produkt nach der Bearbeitung im fertigen Zustand durch einen Kreis abgebildet.

### 3.1.4 Nutzung

In der Nutzung erfüllen Produkte sowohl Gebrauchs- als auch Geltungsfunktionen.<sup>461</sup> Die Nutzung selbst wird in Teilprozesse aufgeteilt (vgl. Bild 3-3).<sup>462</sup>

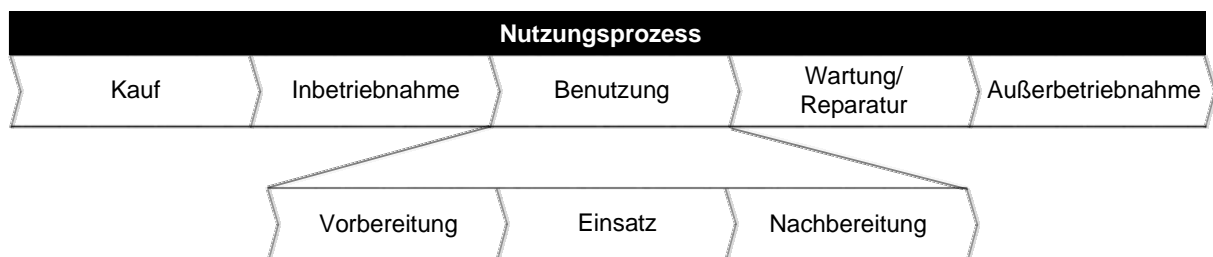


Bild 3-3: Die Teilprozesse der Nutzung<sup>463</sup>

Der Einsatz nimmt eine Sonderstellung innerhalb des Produktlebenslaufes ein. Während Produkte und deren Bestandteile in den Fabrikationsprozessen die Operanden gewesen sind, dienen sie während des Einsatzes selbst als Operator (vgl. Abschnitt 2.1.1 und 2.1.2), evtl. auch in Fabrikationsprozessen (vgl. Abschnitt 3.1).<sup>464</sup> Der Nutzende übernimmt die Aufgaben des Anwendenden nach Bild 2-2. In den anderen

<sup>455</sup> DIN 8580, S. 4

<sup>456</sup> DIN 8580, S. 4; ein Urformen von Rohgegenständen ist nicht nötig (vgl. Abschnitt 3.1.2)

<sup>457</sup> DIN 8580, S. 6

<sup>458</sup> DIN 8593 Blatt 0, S. 2

<sup>459</sup> VDI 2243, S. 35

<sup>460</sup> Steinhilper 2009, S. 287f.; Steinhilper 2012, S. 768ff.

<sup>461</sup> VDI 2803 Blatt 1, S. 3ff.

<sup>462</sup> Dannheim 1999, S. 45ff.

<sup>463</sup> Dannheim 1999, S. 46. nach Dannheim und Birkhofer 1998, S. 28

<sup>464</sup> Diese Aussage ist dahingehend zu relativieren, dass der Operand selber, in dem Fall das zu entwickelnde Produkt, eine Transformation, beispielsweise durch eine Alterung, erfährt. Das kann zu einem Verlust des Nutzens wie auch des Wertes führen. Die Wartung und Reparatur wirken der Alterung entgegen.

fertigungsanalogen Teilprozessen der Nutzung wird das Produkt als Operand außerhalb der Fabrikationsorte fertigungstechnisch bearbeitet.<sup>465</sup>

In jedem dieser Transformationssysteme hat der Nutzende durch beispielsweise die Einsatzintensität, die Wartungshäufigkeiten und die Außerbetriebnahme mit anschließender Entledigung Einfluss auf die Nachhaltigkeit des Produktes. Informationen zu Nutzungsprozessen können während der Produktentwicklung z. B. Befragungen, Beobachtungen, Erfahrungswissen zu ähnlichen Produkten oder Abschätzungen liefern.<sup>466</sup> Die gewonnenen Informationen als Datenbasis für die Produktentwicklung können je nach ihrer Quelle zusätzlich unterschiedliche Qualität haben. Durch individuelles Nutzungsverhalten und Nutzungsfehler<sup>467</sup> etc. kommt es zu Abweichungen von der antizipierten Datenbasis (vgl. Abschnitt 2.2.1.2). Die Informationen sind prospektiv und damit mit einer Unsicherheit behaftet. Ein Antizipieren bzw. eine prospektive Ermittlung mit einer anschließenden Analyse der relevanten Informationen über die Nutzungsprozesse ist aufgrund des Verhaltens des Anwenders daher schwierig.<sup>468</sup> ABELE ET AL. betonen, dass für unterschiedliche Produkte und Produktarten spezielle Modelle für das Antizipieren der Nutzung entwickelt werden müssen.<sup>469</sup>

### 3.1.5 Beseitigung

Materialien der Rohstoffgewinnungs-, Fabrikations- und Nutzungsprozesse, die nicht als Gegenstände verwendet oder als Stoff verwertet werden, verlassen die Technosphäre als Stoffe<sup>470</sup> über die Beseitigung.<sup>471</sup> Abfälle sind Stoffe oder Gegenstände, derer sich der Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss (vgl. Abschnitt 3.1). Eine Entledigung fasst die Verwertung<sup>472</sup> und die Beseitigung von Abfällen zusammen.<sup>473</sup> Die Verwertung findet innerhalb der Technosphäre statt und der Stoff oder Gegenstand erfüllt nach dem Verwertungsprozess einen Zweck innerhalb der Technosphäre.<sup>474</sup> Die Beseitigung wird über die Verwertung abgegrenzt und über die Beseitigungsverfahren definiert.

„Beseitigung [...] ist jedes Verfahren, das keine Verwertung ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden.“<sup>475</sup>

<sup>465</sup> Gramlich 2013, S. 104ff.

<sup>466</sup> Dannheim 1999, S. 68

<sup>467</sup> Dannheim 1999, S. 68

<sup>468</sup> Dannheim 1999, S. 49ff.

<sup>469</sup> Abele et al. 2005, S. 101

<sup>470</sup> In Abschnitt 3.1 ist die Einschränkung eingeführt worden, dass Gegenstände aufgrund ihrer Beschreibung durch extensive Eigenschaften keiner Beseitigung zugeführt werden, da die intensiven Eigenschaften von Stoffen für die Beseitigung ausschlaggebend sind.

<sup>471</sup> Prammer 2009, S. 102f.; VDI 2243, S. 10

<sup>472</sup> Die Systematisierung von Kreislauf- bzw. Verwertungs- und Verwendungsprozessen ist wie in Abschnitt 2.1.2 bereits erwähnt inkonsistent und weist erhebliche Unterschiede im Verständnis einzelner Autoren auf. Der Gesetzgeber spricht ausschließlich von der Verwertung von Abfällen, während eine Verwendung über Materialien ohne Abfalleigenschaften definiert wird. Diese Definition ist inkonsistent zu der in Abschnitt 3.1 Hergeleiteten.

<sup>473</sup> KrWG § 3 Abs. (2)

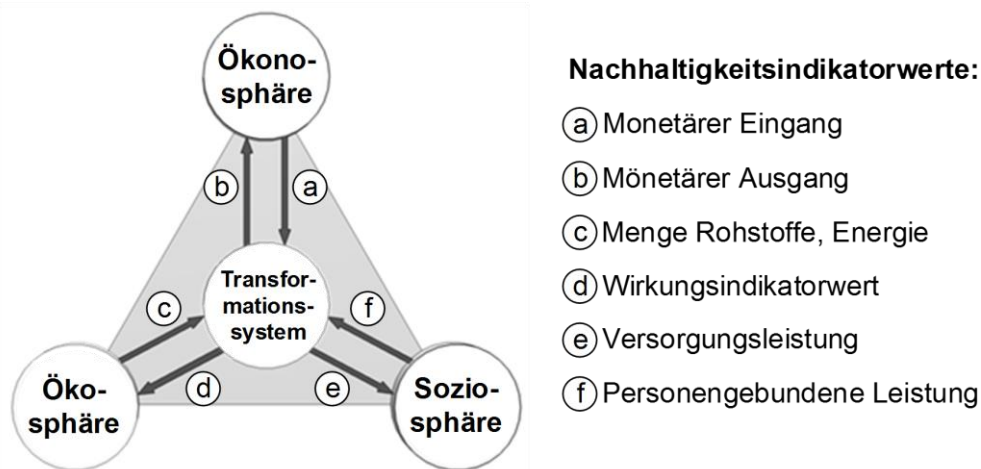
<sup>474</sup> KrWG § 3 Abs. (23)

<sup>475</sup> KrWG § 3 Abs. (26)

Sämtliche Beseitigungsverfahren transformieren Stoffe der Technosphäre zu Stoffen der Ökosphäre. Eine Beseitigung erfolgt durch direktes Einbringen bzw. Deponieren in das Erdreich, die Gewässer bzw. die Luft oder über eine Transformation durch oder nach einer Verbrennung.<sup>476</sup>

### 3.2 Das Partialmodell der Nachhaltigkeit aus Sicht der Produktentwicklung

Wie u. a. in Abschnitt 2.1.2 dargelegt, sind Transformationssysteme für eine Wirkung auf die Nachhaltigkeitssphäre verantwortlich. Nicht das Produkt, wie in Bild 2-8 dargestellt, steht im Spannungsfeld der Nachhaltigkeitssphären sondern der gesamte Produktlebenslauf und sämtliche in der Technosphäre über Material- und Energieflüsse mit dem Produktlebenslauf in Verbindung stehende Transformationssysteme. Die Tatsache, dass innerhalb des virtuellen Produktlebenslaufes nach der Bearbeitung ein Produkt im fertigen Zustand vorliegt, ruft zunächst keine Wirkungen hervor. Um dem Grundgedanken der GPPe gerecht zu werden (vgl. Abschnitt 2.1) und die Konsistenz zur Ökobilanz zu gewährleisten (vgl. Abschnitt 2.2.1.2), steht jedes vom Menschen verursachte oder durchgeführte Transformationssystem innerhalb der Technosphäre in Wechselwirkungen mit den Sphären der Nachhaltigkeit (siehe Bild 3-4).



**Bild 3-4: Das Partialmodell der Nachhaltigkeit und die Nachhaltigkeitsindikatorwerte**

Die Nachhaltigkeitsindikatorwerte a-f aus Bild 3-4 entsprechen den Flüssen von Nachhaltigkeitsindikatorwerten nach Bild 3-1 für ein Transformationssystem. Nach Abschnitt 2.2.1.1 führen Einträge in ein Transformationssystem in Form von Rohstoff- und Energieflüssen bzw. Austräge aus demselben in Form der Wirkungsindikatorwerte zu einer Wirkung innerhalb der Ökosphären. Die Ein- und Austräge haben i. d. R. eine negative Umweltwirkung durch einen steigenden Wirkungsindikator zur Folge.<sup>477</sup> Monetäre Ein- und Ausgänge in und aus dem Transformationssystem führen nach Abschnitt 2.2.1.2 zu einer Wirkung auf die Ökono-sphären. Ihre Differenz hat

<sup>476</sup> KrWG Anlage 1

<sup>477</sup> Zhao 2013, S. 72

einen Einfluss auf die Liquidität als Nachhaltigkeitsindikator der betriebswirtschaftlichen Ökosphäre. Nach Abschnitt 2.2.1.3 haben personengebundene Leistungen und die davon abhängige Versorgungsleistung<sup>478</sup>, beispielsweise die (Grund-) Bedürfnisbefriedigung oder Verwirklichungschancen, eine Wirkung auf die Soziosphären über das Sozialkapital als gesellschaftlicher Nachhaltigkeitsindikator.

Unter Berücksichtigung der notwendigen Materialien und Energien sämtlicher Transformationssysteme des Produktlebenslaufes steht erweitert die Technosphäre mit den über Material- und Energieflüssen in Verbindung stehenden Transformationssystemen im Spannungsfeld der Nachhaltigkeit (vgl. Abschnitt 2.1.2). Über die Superposition jedes Transformationssystemes erfolgt die Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte für die gesamte Technosphäre entsprechend Bild 3-2. In dieser Arbeit werden die Wechselwirkungen der Sphären untereinander verkürzt und nicht betrachtet (vgl. Abschnitt 3).

Auf der einen Seite wird für die zweckdienliche Änderung eines Operanden innerhalb des Transformationssystemes Aufwand betrieben. Je nach Aggregation unterscheiden sich die Nachhaltigkeitsindikatorwerte als Datenbasis zur Analyse der Wirkung auf die Nachhaltigkeitssphären. In den Fabrikationsprozessen beispielsweise entsteht Aufwand durch die Bereitstellung von Materialien, Betriebsmitteln und Humankapital. In der Nutzung entsteht Aufwand durch den Kauf und die Benutzung, durch personengebundene Leistungen und durch evtl. nötige Wartungen oder Reparaturen. Auf der anderen Seite suggerieren die Transformationssysteme innerhalb der Technosphäre die Schöpfung eines Nutzens oder der Versorgung. Fabrikationsprozesse schöpfen Wert für die Unternehmen durch die Transformation eines Materials im Sinne einer Veredelung.<sup>479</sup> Die Beschäftigten als Anwendende der Betriebsmittel oder als Operatoren stellen der Technosphäre ihre persönliche Leistung in Form von Humankapital zur Verfügung. Im Gegenzug erhalten sie einen Nutzen im Sinne der Sicherung des Lebensunterhaltes in Form eines Arbeitsentgeltes oder der Selbstverwirklichung durch schöpferische Arbeit. Während des Einsatzes führt das Produkt zu einem Nutzen bzw. Wert für den Nutzenden.<sup>480</sup> In der Methode zur vergleichenden Ökobilanz wird der Nutzen beispielsweise über eine funktionelle Einheit<sup>481</sup> für alle zu vergleichenden Produktsysteme als Bezugsgröße quantifiziert.<sup>482</sup> Die Bereitstellung des Kundennutzens bzw. die Versorgung zur Befriedigung der Kundenanforderungen wird den Unternehmen durch

---

<sup>478</sup> Nach Bibliographisches Institut GmbH 2016 ist die Versorgungsleistung die „Leistung [...], die der Staat zur Sicherung des Lebensunterhalts gewährt“. Hier wird der amtssprachliche Begriff der Versorgungsleistung auf die gesellschaftliche Nachhaltigkeit übertragen und ist die Leistung, die durch ein Transformationssystem zur Sicherung der (Grund-) Bedürfnisbefriedigung oder der Verwirklichungschancen gewährt wird.

<sup>479</sup> Westkämper 2006, S. 33ff.

<sup>480</sup> Redlich 2011, S. 23

<sup>481</sup> Die funktionelle Einheit ist sprachlich im Zusammenhang mit der Ökobilanz irreführend. Das Adjektiv funktionell impliziert nach Bibliographisches Institut GmbH 2014b eine Bewertung hinsichtlich einer Funktionsfähigkeit. Für die Bezugseinheit ist hingegen das Adjektiv funktional im Sinne des Bezuges auf eine Funktion (vgl. Bibliographisches Institut GmbH 2014a) passender.

<sup>482</sup> DIN EN ISO 14040, S. 10

einen Gegenwert in Form eines Marktpreises, der Leasingraten oder der Mietpreise vergütet.

Die Produktentwicklung beeinflusst die in Bild 3-4 dargestellten Nachhaltigkeitsindikatorwerte. Die Entscheidung für oder gegen einen Werkstoff beispielsweise beeinflusst den nachhaltigen Zustand sowohl des Lebenslaufes des zu entwickelnden Produktes als auch anderer Transformationssysteme innerhalb der Technosphäre. Eine Entscheidung für eine Verwendung als Alternative zu der stattfindenden Verwertung als Referenz<sup>483</sup> beispielsweise, leitet Gegenstände in die Bearbeitung wogegen in der Verarbeitung die Menge an Stoff nicht mehr ankommt. Die Entscheidung für eine Verwertung und gegen eine Beseitigung als Referenz hat denselben Effekt auf andere Transformationssysteme des Produktlebenslaufes.

Beispielsweise hat die Einführung der Pfandpflicht für Einwegverpackungen von Getränken durch die *Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen (VerpackV)* zu einer Restrukturierung sämtlicher mit der Einwegverpackung in Verbindung stehender Produktlebensläufe geführt. Der Gesetzgeber verfolgt ökonomische und ökologische Ziele mit der Einführung der Pfandpflicht.<sup>484</sup> Durch eine Harmonisierung der Verpackungsabfall- und Verpackungswirtschaft sollen Handelshemmnisse und Wettbewerbsverzerrung innerhalb der Europäischen Union beseitigt werden.<sup>485</sup> Die Erhebung eines Pfands für Einweggetränkeverpackungen soll die Verbraucher zur Vermeidung von Abfall durch eine Bevorzugung der Mehrwegflaschen bewegen.<sup>486</sup> Weiterhin wird ein Rücknahmesystem eingeführt, welches die Einwegverpackungen sammelt.<sup>487</sup> Entsprechend wird der Materialfluss der Einwegverpackungen für Getränke vom privaten häuslichen Abfall und der anschließenden Trennung oder Beseitigung als Referenz zu der Verwertung geleitet. Kündigungen aufgrund des geringeren Mengenumsatzes in der kommunalen Entsorgungs- und Kreislaufbranche sind die Folge gewesen.<sup>488</sup> Betriebsbedingte Kündigungen hat es ebenfalls in anderen Bereichen der Technosphäre gegeben. Abfüllende, Herstellende und Lieferanten von Einweg-Getränkeverpackungen haben geringere Auftragszahlen aufgrund des Konsumverzichtes verzeichnet, die Entlassungen zur Folge gehabt haben.<sup>489</sup> Durch die für die Rücknahme eingesetzten Automaten hat sich gleichzeitig ein neuer Wirtschaftszweig mit entsprechenden Lebensläufen und Arbeitsplätzen etabliert.<sup>490</sup> Dieses Beispiel veranschaulicht zwei wichtige Sachverhalte. Zum einen wird der Einfluss von

---

<sup>483</sup> DIN EN ISO 14040, S. 11ff. spricht von Referenzflüssen oder Referenzeinheiten. Wird, wie in diesen Beispielen, ein Transformationssystem sprachlich als Vergleichsprozess verwendet, wird es konsistent zu DIN EN ISO 14040 als Referenz-Transformationssystem oder nur Referenz bezeichnet.

<sup>484</sup> An der Stelle muss erwähnt werden, dass die nachfolgend beschriebenen Ziele durch die Einführung des Pfandes für Einwegverpackungen von Getränken nicht uneingeschränkt erreicht worden sind. Zum einen ist der ökologische Vorteil von Mehrwegverpackungen nach Detzel et al. 2010, S. 7ff. nicht eindeutig geklärt. Zum anderen hat nach Schabelon 2013 eine Harmonisierung des Marktes wegen Tricks der Einzelhändler ebenfalls nicht flächendeckend stattgefunden.

<sup>485</sup> VerpackV § 1 Abs. (1) - (2)

<sup>486</sup> VerpackV § 1 Abs. (2)

<sup>487</sup> VerpackV § 6 Abs. (2)

<sup>488</sup> Lehrke 2003

<sup>489</sup> Mitteldeutsche Zeitung 2003

<sup>490</sup> Barz 2015

Entscheidungsträgern auf die Lebensläufe von Produkten durch die Manipulation von Materialflüssen und die resultierenden Folgen auf die Nachhaltigkeit deutlich. Zum anderen hat die Optimierung hinsichtlich eines Aspektes oder zwei Aspekten der Nachhaltigkeit Folgen auf sämtliche Sphären.

Übertragen auf die Produktentwicklung beeinflusst sie über die unabhängigen Eigenschaften nicht nur die bearbeitenden Transformationssysteme innerhalb des Produktlebenslaufes des zu entwickelnden Produktes, sondern auch mit dem Produktlebenslauf in Verbindung stehende Transformationssysteme anderer Produktlebensläufe der Technosphäre. Die kausale Kette zwischen den unabhängigen und abhängigen Eigenschaften lässt sich in Bezug auf das Verständnis der Nachhaltigkeitssphären nach Abschnitt 2.2 auf Indikatorwerte reduzieren. Ihre Individualisierung hängt von dem informatorischen Abstand zwischen der Produktentwicklung und dem jeweiligen Transformationssystem und dem Stand der Produktentwicklung ab.

Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Sphären der Nachhaltigkeit nach Bild 3-4 eingegangen. Insbesondere wird der Zusammenhang zwischen dem nachhaltigen Zustand der Sphären mit den Nachhaltigkeitsindikatorwerten erläutert.

### **3.2.1 Das Partialmodell der Ökosphäre**

Mehr als zwei Drittel der Umweltwirkungen von Produkten entlang des Produktlebenslaufes werden bereits in der Produktentwicklung festgelegt.<sup>491</sup> Ein Produkt ist ökologisch nachhaltig, wenn es im Vergleich zu einem Referenz-Produkt gleicher funktionaler Einheit geringere Umweltwirkungen bzw. geringere Nachhaltigkeitsindikatorwerte bzw. Nachhaltigkeitsindikatoren über den gesamten Produktlebenslauf hinweg verursacht bzw. hervorruft. Um die ökologische Bilanz eines zu entwickelnden Produktes zu verbessern, stehen der Produktentwicklung eine Vielzahl von Maßnahmen zur Verfügung.<sup>492</sup> Sie beziehen sich auf unterschiedliche Lebenslaufprozesse und sind in unterschiedlichen Teilprozessen der Produktentwicklung anwendbar.<sup>493</sup> Beispielsweise integrieren WIMMER UND ZÜST den Umweltgedanken durch Handlungsanweisungen in Form von nicht umweltspezifischen Fragen in die Arbeitsschritte der Produktentwicklung.<sup>494</sup>

---

<sup>491</sup> Schimmelpfeng 1999, S. V; Tischner 2000, S. 9

<sup>492</sup> u. a. Zhao 2013, S. 190ff.; Vezzoli und Manzini 2008, S. 64ff.; Birkhofer et al. 2012, S. 577ff.; Luttrupp und Lagerstedt 2006, S. 1401

<sup>493</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 569ff.; Tischner und Dietz 2000, S. 39ff.; Zhao 2013, S. 124ff.; Spengler und Schröter 2001, S. 227ff.; Müller et al. 2000, S. Abschnitt 3.2.1/Seite 1ff.

<sup>494</sup> Wimmer und Züst 2001, S. 121ff.

Das Partialmodell der Ökosphäre wird durch die Ökobilanz vorgegeben (vgl. Abschnitt 2.2.1.1). Die Modellbildung der Ökosphäre erfolgt über das Charakterisierungsmodell der Wirkkategorien nach Formel (1).

$MEf_{i,j}$	$W_{j,k} = f(WW_{j,w}(MEf_{i,j}, C_{i,w}), X_w)$ (1)	$W_{j,w}$
-------------	------------------------------------------------------	-----------

mit	$W_{j,w}$	Wirkungsindikator eines Transformationssystems j zur Wirkungskategorie w
	$WW_{j,w}$	Wirkungsindikatorwert eines Transformationssystems j zur Wirkungskategorie w
	$MEf_{i,j}$	Menge eines Elementarflusses i eines Transformationssystems j
	$C_{i,w}$	Charakterisierungsfaktor eines Elementarflusses i zur Wirkungskategorie w
	$X_w$	Berechnungsfaktor einer Wirkungskategorie w

Das Partialmodell zur Abschätzung der anthropogenen Wirkung auf die Ökosphäre wird mit der Gesamtheit aller Partialmodelle der Wirkungskategorien gleichgesetzt.<sup>495</sup> Der Wirkungsindikator wird über den Wirkungsindikatorwert und einem für die jeweilige Wirkungskategorie verwendeten Berechnungsfaktor individualisiert. Der Wirkungsindikatorwert seinerseits wird über die Elementarflüsse und einen sowohl wirkungskategoriespezifischen als auch elementarflussspezifischen Charakterisierungsfaktor individualisiert.

Das Charakterisierungsmodell beschreibt den Zusammenhang zwischen den Elementarflüssen und der Umweltwirkung über Charakterisierungsfaktoren zu der jeweiligen Wirkungskategorie.<sup>496</sup> Da die Elementarflüsse sowohl Stoffe als auch Energien sein können,<sup>497</sup> wird über die Individualisierung der Elementarflüsse zu Wirkungsindikatorwerten eine gemeinsame Einheit für die Wirkungsabschätzung geschaffen. Sie entsprechen den ökologischen Indikatorwerten in Bild 3-1 bzw. den Flüssen d in Bild 3-4. Sie beschreiben den Fluss bzw. die Größen aus den Transformationssystemen der Technosphäre, die nach dem Übergang in die Ökosphäre dort eine Wirkung hervorrufen. Der Umweltwirkungsmechanismus führt zu einer Änderung spezifischer Eigenschaften der Subsphären der Ökosphäre, die durch Wirkungsindikatoren beschrieben werden. Die Datenbasis des Partialmodelles der Ökosphäre bildet das Ergebnis des Individualmodells der Sachbilanz als Individualisierung von Transformationssystemen durch verursachte Elementarflüsse in der Technosphäre.<sup>498</sup> Andere Größen und benötigte Daten sind durch die Individualmodelle zu den partialen Charakterisierungsmo-

<sup>495</sup> Das Ergebnis der Individualisierung der Formel (1) ist die Zustandsbeschreibung der Ökosphäre über das Merkmal Wirkungskategorie und einen Wert in Form des Wirkungsindikators.

<sup>496</sup> DIN EN ISO 14044, S. 35

<sup>497</sup> DIN EN ISO 14040, S. 9

<sup>498</sup> DIN EN ISO 14040, S. 25ff.

dellen abgebildet. Die Ökobilanz gibt weder Methoden zur Individualisierung von Prozessinformationen zu Elementarflüssen noch zur Individualisierung der Elementarflüsse über Wirkungsindikatorwerte zu Wirkungsindikatoren vor.<sup>499</sup>

Im Folgenden werden die Zusammenhänge aus Formel (1) innerhalb des Partialmodells der Ökosphäre beispielhaft an der Wirkkategorie *Erderwärmung* nach der Methode *Baseline* über 100 Jahre des *Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC)* spezialisiert.<sup>500</sup> Nach KLOEPFFER UND GRAHL läuft das Vorgehen zur Wirkungsabschätzung anderer Wirkungskategorien gleichermaßen ab.<sup>501</sup>

$MEf_{i,j}$	$\Delta F_j = CO_2\ddot{a}_j * AGWP_{100,CO_2}$ (2)	$\Delta F_j$
	$CO_2\ddot{a}_j = \sum_{i=1}^n MEf_{i,j} * GWP_{100,i}$ (3)	

mit	$\Delta F_j$	Wirkungsindikator eines Transformationssystems j zur Erderwärmung	$\frac{W}{m^2}$
	$CO_2\ddot{a}_j$	Kohlendioxid-Äquivalent eines Transformationssystems j	$kg_{CO_2}$
	$AGWP_{100,CO_2}$	Absolutes globales Treibhauspotenzial des Kohlendioxides über 100 Jahre <sup>502</sup>	$\frac{W}{m^2 kg_{CO_2}}$
	$GWP_{100,i}$	Globales Treibhauspotenzial des Treibhausgases i über 100 Jahre	$\frac{kg_{CO_2}}{kg_i}$

Die Berechnung der Wirkungsindikatoren der Erderwärmung erfolgt auf Basis der „ungestörten“ troposphärischen Eigenschaften im Jahr 1750 und quantifiziert den Zusammenhang zwischen der Änderung von Konzentrationen von Kohlendioxid in der Tropopause und der damit verbundenen Veränderung der stratosphärischen Temperatur durch die veränderte Nettoeinstrahlung (Treibhauseffekt).<sup>503</sup> Hier wird die Ökosphäre durch die Stratosphäre als Subsystem individualisiert. Da die Erderwärmung nicht adäquat zu messen ist, wird als Wirkungsindikator der Strahlungsantrieb nach Formel (2) herangezogen.<sup>504</sup> Als Charakterisierungsfaktoren werden globale Treibhauspotenziale (*Global Warming Potential-GWP*) herangezogen, die über ein mathematisches Charakterisierungsmodell individualisiert werden.<sup>505</sup> Das relative Treibhauspotenzial, es entspricht  $C_{i,k}$  aus Formel (1), gibt den relativen Wirkungsgrad der Strahlenabsorption unterschiedlicher Treibhausgase in Relation zu dem Referenzgas Kohlendioxid über

<sup>499</sup> DIN EN ISO 14040, S. 18; die fehlende Vorgabe der Partialmodelle führt zu einer von der jeweiligen Software zur Ökobilanzierung abhängigen Individualisierung der Indikatoren ausgehend von identischen Datenbasen.

<sup>500</sup> DIN EN ISO 14044, S. 37

<sup>501</sup> Kloepffer und Grahl 2009, S. 210ff.

<sup>502</sup> Das absolute globale Treibhauspotenzial für Kohlendioxid, es entspricht  $X_k$  aus Formel (1), beträgt nach IPCC 2007, S. 311  $8,94 * 10^{-14} \frac{W}{m^2 kg_{CO_2}}$ .

<sup>503</sup> IPCC 2007, S. 951

<sup>504</sup> DIN EN ISO 14044, S. 37

<sup>505</sup> IPCC 2007, S. 31

einen Zeitraum von 100 Jahren an.<sup>506</sup> Der Wirkungsindikatorwert Kohlendioxid-Äquivalent<sup>507</sup> nach Formel (3) superponiert den Treibhauseffekt unterschiedlicher Treibhausgase als Elementarflüsse des betrachteten Transformationssystems in Relation zu Kohlendioxid. Als relevante Elementarflüsse für die Erderwärmung werden 78 verschiedene Treibhausgase definiert.<sup>508</sup> Jedem Treibhausgas wird ein relatives Treibhauspotenzial zugeordnet,<sup>509</sup> das wiederum durch andere Partialmodelle individualisiert wird<sup>510</sup> und durch Konstanten in das Partialmodell der Erderwärmung einfließt. Methan hat beispielsweise eine 25-fach höhere Wirkung auf die Strahlenabsorption als Kohlendioxid, Distickstoffmonoxid die 298-fache Wirkung.<sup>511</sup>

Das in Formel (2) beschriebene Partialmodell der Ökosphäre wird für die vereinfachte ökologische Bewertungsmethode nach Abschnitt 2.2.1.2 weiter verkürzt. Das Partialmodell zur MIPS-Methode nach Formel (4) und (5)<sup>512</sup> verkürzt das Vorgehen der Ökobilanz um die Sachbilanz und die Individualisierung des Wirkungsindikators.

Das MIPS benutzt als Datenbasis keine Elementarflüsse sondern Material- bzw. Energiemengen oder Transportstrecken. Die Sachbilanz und die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte werden über die Material-Intensität charakterisiert und zusammengefasst.

$M_{i,j}$	$MIPS_{j,k} = \frac{1}{S} * MI_{j,k} \quad (4)$	$MIPS_{j,k}$
	$MI_{j,k} = \sum_i^n M_{i,j} * MI_{i,k} \quad (5)$	

mit	$MIPS_{j,k}$	Material-Input pro Serviceeinheit eines Transformationssystemes j der Mlt-Kategorie k	kg
	S	Serviceeinheit	-
	$MI_{j,k}$	Material-Input eines Transformationssystemes j der Mlt-Kategorie k	kg, J, km
	$M_{i,j}$	Menge an Materialien, Energien oder Strecke i eines Transformationssystemes j	kg, J, km
	$MI_{i,k}$	Material-Intensität eines Materials, einer Energie oder einer Strecke i der Mlt-Kategorie k	$\frac{kg}{kg}$ , $\frac{kg}{J}$ , $\frac{kg}{km}$

<sup>506</sup> IPCC 2007, S. 946

<sup>507</sup> DIN EN ISO 14044, S. 37

<sup>508</sup> IPCC 2007, S. 33–34

<sup>509</sup> IPCC 2007, S. 33–34

<sup>510</sup> IPCC 1990, S. 58

<sup>511</sup> IPCC 2007, S. 33

<sup>512</sup> Schmidt-Bleek und Klüting 1993, S. 129

Es werden die Mlt-Kategorien:

- Abiotische (abiot.) Rohstoffe,
- Biotische (biot.) Rohstoffe,
- Wasser und
- Luft

angegeben.<sup>513</sup> Die Material-Intensität in Formel (5) beschreibt als 4x1-Matrix die Menge an Rohstoffen, Boden, Wasser und Luft, die zur Bereitstellung der Materialien und Energien der Transformationssysteme innerhalb der Technosphäre in der Ökosphäre bewegt worden sind.<sup>514</sup> Analog zu der funktionalen Einheit der Ökobilanz wird der Material-Input zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Transformationssysteme über die Serviceeinheit normiert.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1.1 angedeutet, sind die unabhängigen Werkstoffeigenschaften und die Geometrien die Hauptstellhebel der Produktentwicklung für die Umweltwirkung entlang des Produktlebenslaufes. Sie bedingen nicht nur abhängige Eigenschaften wie die benötigte Werkstoffmenge bzw. das Gewicht, sondern auch die Fertigungs- und Montageprozesse und darüber die Umweltwirkung der Transformationssysteme über die hervorgerufenen Wirkungsindikatorwerte. Für den Einsatz von aktiven Produkten haben das physikalische Prinzip und die festgelegte Wirkstruktur maßgeblichen Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit, bei passiven Produkten die be- und verarbeiteten Materialien.

Zur Analyse der Umweltwirkung eines zu entwickelnden Produktes entlang des Produktlebenslaufes antizipiert die Produktentwicklung zunächst die beteiligten Transformationssysteme und synthetisiert die Indikatorwerte entsprechend dem Partialmodell der Ökosphäre. Bei der Wahl des zu verwendenden Partialmodelles ist auf die Konsistenzen zwischen der Datenbasis und den Verkürzungsmerkmalen des jeweiligen Produktmodelles und des Partialmodelles der Ökosphäre zu achten. Für den Teilprozess des Konzipierens eignet sich die MIPS-Methode nicht ausschließlich wegen des geringeren Aufwandes zur Durchführung im Vergleich zur Ökobilanz (vgl. Abschnitt 2.2.1.1).<sup>515</sup> Die Ökobilanz ist nicht als Methodik einer durchgehenden entwicklungsbegleitenden ökologischen Prozessanalyse geeignet.<sup>516</sup> Sie ist durch ihre methodischen Handlungsanweisungen und ihre Partialmodelle auf die ökologische Bilanzierung bereits bestehender Produkte ausgelegt worden. Beispielsweise ist eine Durchführung der Sachbilanz im Konzipierens nicht möglich. Zu diesem Zeitpunkt sind die Materialien und Geometrien noch nicht hinreichend festgelegt, geschweige denn Informationen zu den Transformationssystemen bekannt. Eine Synthese bzw. ein Antizipieren von Treibhausgasen, beispielsweise auf Konzeptebene, ist undenkbar.

---

<sup>513</sup> Ritthoff et al. 2002, S. 14

<sup>514</sup> Schmidt-Bleek und Klütting 1993, S. 19ff.; Ritthoff et al. 2002, S. 6; Ritthoff et al. 2002, S. 13

<sup>515</sup> Pastewski 2009, S. 188; Rohn et al. 2010, S. 20; nach Ritthoff et al. 2002, S. 13 reicht zum Vergleich von Werkstoffalternativen oder alternativen Geometrien verschiedener Wirkprinzipien die Berechnung des Material-Inputs der Konzeptvariante bzw. einzelnen Teilfunktionen nach Formel (5) aus.

<sup>516</sup> Seitz 2003, S. 62ff.

„Erst in der späten Entwurfsphase, d. h. nach dem Vorliegen des Gesamtentwurfs, steht eine wesentlich breitere unveränderliche Datenbasis für die LCA<sup>[517]</sup> zur Verarbeitung bereit.“<sup>518</sup>

EGEDE ET AL. empfehlen den Einsatz der Ökobilanz zu dem Entwicklungszeitpunkt, an dem erste technische Zeichnungen und Stücklisten erarbeitet worden sind.<sup>519</sup>

### 3.2.2 Die Partialmodelle der Ökonosphäre

Analog zu den Zusammenhängen der Ökosphäre hat die Produktentwicklung einen Einfluss auf die monetären Flüsse entlang des gesamten Produktlebenslaufes (vgl. Abschnitt 2.2.1.2).<sup>520</sup> Welche monetären Flüsse zu betrachten sind bzw. welche Subsysteme der Ökonosphäre zu betrachten sind, hängt von der jeweiligen Anspruchsgruppe und der Produktart ab.<sup>521</sup> Für das produktentwicklungsnahe Unternehmen sind die Kosten während der produktentwicklungsnahe Fabrikationsprozesse und der Umsatz während der Marktphase ausschlaggebend. Aus Sicht der Zulieferer sind die Menge und Art der gelieferten Produkte von Interesse. Für die Kunden sind aus ökonomischer Sicht die Nutzungskosten bzw. die Kosten während eines Bilanzierungszeitraumes entscheidend (vgl. Abschnitt 2.2.1.2).<sup>522</sup> Weiterhin hat die Produktart bzw. haben die Transformationssysteme unterschiedlicher Kundensegmente und Anspruchsgruppen einen Einfluss auf das Verständnis des Partialmodelles der ökonomischen Sphäre der Betriebswirtschaft. Unabhängig von der Aggregationsebene und der Anspruchsgruppe werden wirtschaftliche Kennzahlen als Grundlage einer ökonomischen Nachhaltigkeitsbetrachtung herangezogen (vgl. Abschnitt 2.2.1.2). Die Kennzahl der ökonomischen Wirkung eines Transformationssystemes ist somit von sämtlichen hervorgerufenen monetären Eingängen und Ausgängen eines Transformationssystemes bzw. eines leistungswirtschaftlichen Prozesses abhängig. Formel (6) beschreibt allgemein den Zusammenhang zwischen Nachhaltigkeitsindikatorwerte und den Kennzahlen.

$ME_{j,a}$ $MA_{j,a}$	$ÖK_{j,a} = ME_{j,a} - MA_{j,a}$ (6)	$Ök_{j,a}$
--------------------------	--------------------------------------	------------

mit	$ME_{j,a}$	Monetär-Eingang eines Transformationssystemes j der Anspruchsgruppe a	Ge
	$MA_{j,a}$	Monetär-Ausgang eines Transformationssystemes j der Anspruchsgruppe a	Ge
	$ÖK_{j,a}$	Ökonomische Kennzahl eines Transformationssystemes j der Anspruchsgruppe a	Ge

<sup>517</sup> Life Cycle Assessment oder Lebenszyklusanalyse, womit die Ökobilanz gemeint ist

<sup>518</sup> Seitz 2003, S. 64

<sup>519</sup> Egede et al. 2014, S. 239

<sup>520</sup> Tischner 2000, S. 9

<sup>521</sup> Stark et al. 2008, S. 193

<sup>522</sup> In Anlehnung an Abschnitt 2.1 wird die technische Funktionserfüllung für den jeweiligen Einsatz als klassische Anforderung an ein Produkt vorausgesetzt.

Die Datenbasis des Partialmodelles wird je nach Aggregationsebene bzw. Subsystem und Anspruchsgruppe im Folgenden weiter spezialisiert. Dabei werden die Transformationssysteme der Bearbeitung des produktentwicklungsnahen Unternehmens, die restlichen Bearbeitungs- und Verarbeitungsprozesse innerhalb der Technosphäre als Zulieferer- bzw. Kreislaufprozesse des Beschaffungsmarktes, die Nutzungsprozesse von Konsum- und Investitionsgütern und die Beseitigungsprozesse entsprechend dem Modell der Technosphäre nach Kapitel 3.1 unterschieden. Die Verkürzung auf die ökonomischen Wirtschaftseinheiten der Betriebe und der Privathaushalte ist in der nicht vorhandenen Beeinflussbarkeit der Produktentwicklung auf die Aggregationsebene bzw. das ökonomische Subsystem der Volkswirtschaft begründet. Die Produktentwicklung hat sicherlich Einfluss auf die volkswirtschaftlichen Kennzahlen einer Gesellschaft. Sie sind von der ökonomischen Nachhaltigkeit aller an der Volkswirtschaft beteiligten Betriebe und Privathaushalte abhängig. Sie wird in dieser Arbeit aus Konsistenzgründen zur Soziosphäre nach Abschnitt 2.1.3 und 2.3 nicht berücksichtigt.

### **3.2.2.1 Das Partialmodell der produktentwicklungsnahen Ökonosphäre**

Innerhalb des produktentwicklungsnahen Unternehmens verursacht die Produktentwicklung 6 % der Kosten, sie hat gleichzeitig die höchste Kostenverantwortung mit 70%.<sup>523</sup> So werden bei der Untersuchung von EHRENSPIEL rund 65 % der Kosteneinsparung durch Maßnahmen während Produktentwicklung erreicht.<sup>524</sup> Der Einkauf bzw. die Beschaffung der Materialien für die produktentwicklungsnahen Bearbeitungsprozesse verursacht hingegen innerhalb des produktentwicklungsnahen Unternehmens 76 % der Kosten.<sup>525</sup>

Für den ökonomischen Erfolg der produktentwicklungsnahen Transformationssysteme ist die Differenz aus den Zielkosten und den antizipierten Selbstkosten maßgeblich, wobei die Produktentwicklung Einfluss auf die Einzelkosten der produktentwicklungsnahen Bearbeitungsprozesse nimmt (vgl. Abschnitt 2.2.1.2). Beispielsweise haben die metallver- bzw. bearbeitenden Wirtschaftszweige Materialkostenanteile am Bruttoproduktionswert von 63,4 %, Kostenanteile für Beschäftigte von 17,4 %, Energiekostenanteile von 6 % und restliche Kostenanteile von 12,6 %.<sup>526</sup> KOLLER fasst die Kostenbeeinflussung durch die Produktentwicklung über die Senkung von Material-, Fertigungs- und Montagekosten zusammen.<sup>527</sup>

---

<sup>523</sup> Hubka 1976, S. 6f.

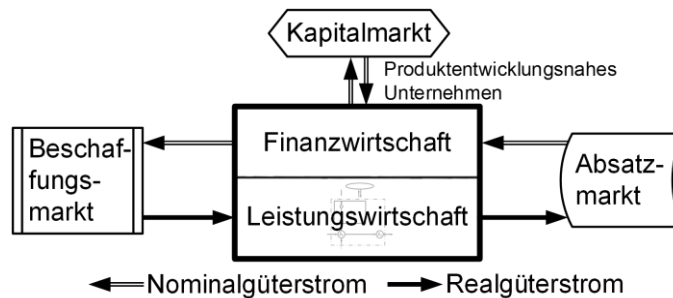
<sup>524</sup> Ehrlenspiel 1980, S. 177

<sup>525</sup> Hubka 1976, S. 6f.

<sup>526</sup> Statistisches Bundesamt 2015f, S. 294; der Materialkostenanteil berücksichtigt den Materialverbrauch und den Einsatz an Handelswaren ohne den Energieverbrauch. Der Beschäftigungskostenanteil fasst die Kosten für Personal, Lohn- und Leiharbeit zusammen. Die Energiekosten enthalten den Kostenanteil des Energieumsatzes an dem Materialverbrauch. Die restlichen Kosten berücksichtigen Dienstleistungen, Kostensteuern, Mieten bzw. Pachten, Abschreibungen, Fremdkapitalzinsen und sonstige Kosten.

<sup>527</sup> Koller 1985, S. 164ff.

Bild 3-5 veranschaulicht den monetären Zusammenhang zwischen der Finanzwirtschaft als Ökonosphäre des produktentwicklungsnahen Unternehmens und der Leistungswirtschaft als Transformationssystem der Technosphäre.



**Bild 3-5: Das betriebswirtschaftliche Partialmodell des produktentwicklungsnahen Unternehmens<sup>528</sup>**

Die Liquidität bzw. die ökonomische Nachhaltigkeit des produktentwicklungsnahen Unternehmens ist von den Nominalgütereingangsfüssen, die während des Marktzyklus erwirtschaftet werden, und den Nominalgüterausgangsfüssen, die während des Entstehungszyklus zur Entwicklung des Produktes benötigt werden, abhängig. Sie werden in Formel (6) als Monetär-Eingang und -Ausgang bezeichnet.

#### 3.2.2.1.1 Das Partialmodell der Kosten während des Entstehungszyklus

Die Erfassung der ausgehenden bzw. negativen Nominalgüterflüsse der Finanzwirtschaft eines Unternehmens als betriebswirtschaftliches Subsystem der Ökonosphäre während des Entstehungszyklus erfolgt durch die Kostenrechnung.

„Der wertmäßige Kostenbegriff bezeichnet denjenigen bewerteten Verzehr von Gütern und Dienstleistungen als Kosten, der zur Erstellung und zum Abschnitt der betrieblichen Leistung sowie zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft in der betrachteten Periode erforderlich ist.“<sup>529</sup>

Am Beispiel der Maschinenstundensatzrechnung basierend auf der differenzierenden Zuschlagskalkulation wird das Partialmodell der Kostenrechnung bzw. des Monetär-Ausganges verdeutlicht.

Die differenzierende Zuschlagskalkulation ist eine statische Methode der Kostenträgerrechnung und unterscheidet zwischen Einzelkosten und Gemeinkosten jeweils in Ge-Äquivalenten.<sup>530</sup> Sie wird auch als Entscheidungshilfe während der Produktentwicklung im Teilprozess des Entwerfens herangezogen.<sup>531</sup> Die Einzelkosten werden dem Realgut-Ausgang bzw. dem Kostenträger direkt zugerechnet.<sup>532</sup> Die variablen Einzelkosten entsprechen den Kosten für die Realgüter Arbeitskraft bzw. Fertigungslohnkosten und Materialeinzelkosten für die leistungswirtschaftlichen Prozesse bzw. die Transformationssysteme.<sup>533</sup> Die Gemeinkosten werden auch als indirekte Kosten

<sup>528</sup> in Anlehnung an Bild 2-9 nach VDI 2234, S. 8, Ossadnik 2008, S. 3 und Kosiol 1968, S. 145

<sup>529</sup> Ossadnik 2008, S. 33

<sup>530</sup> VDI 2234, S. 23; Domschke und Scholl 2005, S. 340

<sup>531</sup> VDI 2235, S. 9ff.; VDI 2225 Blatt 1, S. 2ff.

<sup>532</sup> VDI 2234, S. 19; Domschke und Scholl 2005, S. 340;

<sup>533</sup> VDI 2234, S. 25; VDI 2234, S. 11; Schlink 2014, S. 71

bezeichnet und können aufgrund ihrer Verursachung durch mehrere Kostenträger nicht einem einzelnen Realgut bzw. Erzeugnis oder dem zu entwickelnden Produkt zugeordnet werden.<sup>534</sup> Dazu zählen sowohl fixe Kosten wie für die Arbeitskraft der finanzwirtschaftlichen Prozesse oder der Produktentwicklung, die Zinsen und Mieten als auch variable Kosten für Maschinen wie die Energiekosten oder Betriebsstoffe.<sup>535</sup> Sie werden über Gemeinkostenzuschlagssätze mit den Einzelkosten berechnet.<sup>536</sup>

$Bak_p$	$Sk_p = Bak_p + Vgk_p(Bak_p) + Vk_p(Bak_p)$ (7)	$Sk_p$
---------	-------------------------------------------------	--------

mit	$Bak_p$	Bearbeitungskosten <sup>537</sup> des Produktes p <sup>538</sup>	€
	$Vgk_p$	Verwaltungsgemeinkosten des Produktes p	€
	$Vk_p$	Vertriebskosten des Produktes p	€
	$Sk_p$	Selbstkosten des Produktes p	€

Formel (7) fasst das Partialmodell der Selbstkosten nach der differenzierenden Zuschlagskalkulation zusammen.<sup>539</sup>

	$Bak_p = Mk_p + Fk_p$ (8)	
$Mek_{p,j}$ $Fik_{p,j}$	$Mk_p = \sum_{j=1}^n [Mek_{p,j} * (1 + Mgzks_j)]$ (9)	$Bk_p$
	$Fk_p = \sum_{j=1}^n [Fik_{p,j} * (1 + Fgzks_j)]$ (10)	

mit	$Mek_{p,j}$	Materialeinzelkosten des Produktes p im Transformationssystem j <sup>540</sup>	€
	$Fik_{p,j}$	Fertigungslohnkosten des Produktes p im Transformationssystem j	€
	$Mk_p$	Materialkosten des Produktes p	€
	$Fk_p$	Fertigungskosten des Produktes p	€
	$Mgzks_j$	Materialgemeinkostenzuschlagssatz des Transformationssystemes j	%
	$Fgzks_j$	Fertigungsgemeinkostenzuschlagssatz des Transformationssystemes j	%

<sup>534</sup> VDI 2234, S. 10

<sup>535</sup> VDI 2234, S. 11; Schlink 2014, S. 72

<sup>536</sup> VDI 2234, S. 25; Domschke und Scholl 2005, S. 340

<sup>537</sup> I. d. R. wird von Herstellungskosten gesprochen. Aus Gründen der Konsistenz zu Abschnitt 3.1 wird in diesem Abschnitt von Bearbeitungskosten gesprochen.

<sup>538</sup> Plinke und Rese 2006, S. 122 sprechen von Aufträgen und nicht von Produkten.

<sup>539</sup> VDI 2234, S. 25; Schweitzer und Küpper 2011, S. 173; Plinke und Rese 2006, S. 122ff.

<sup>540</sup> Plinke und Rese 2006, S. 122 summieren über die Kostenstellen auf. Hier werden die Kostenstellen durch Transformationssysteme abgebildet. Eine Kostenstelle kann ein Transformationssystem oder eine Kette mehrerer Transformationssysteme beinhalten.

Die Datenbasis des Partialmodelles der Selbstkosten bilden die Bearbeitungskosten, von ihnen sind auch die Verwaltungsgemein- und Vertriebskosten abhängig.<sup>541</sup> Formeln (8)-(10) spezialisieren das Partialmodell der Bearbeitungskosten.

Als Datenbasis dienen die Materialeinzel- und Fertigungslohnkosten mit entsprechenden Gemeinkostenzuschlagssätzen.<sup>542</sup> Die am weitesten verbreitete Methode zur Kostenrechnung ist die Maschinenstundensatzrechnung als Spezialisierung der bereits vorgestellten differenzierenden Zuschlagskalkulation.<sup>543</sup> Durch die Abspaltung der variablen Maschinenkosten von den Fertigungsgemeinkosten, die dem Multiplikand der Formel (10) entsprechen, soll das Kausalitätsprinzip der Zuordnung von Kosten zu einzelnen Transformationssystemen erfüllt werden.

Die Fertigungskosten werden entsprechend Formel (11) neben den Fertigungslohnkosten zusätzlich in Maschinenkosten über Maschinenstundensätze<sup>544</sup> und Restfertigungsgemeinkosten aufgeteilt.<sup>545</sup> Der Maschinenstundensatz ist von der jeweiligen Art der Maschine bzw. des Operatoren und den mit ihr bzw. ihm verbundenen kalkulatorischen Abschreibungen und Zinsen, den Raum- und Energiekosten als auch den Instandhaltungskosten abhängig.<sup>546</sup> Durch die Berücksichtigung eines Maschinenkostensatzes soll eine (vermeintlich) verursachungsgerechtere Berechnung der Fertigungsgemeinkosten einzelner Kostenträger im Vergleich zu der differenzierenden Zuschlagskalkulation erfolgen.<sup>547</sup>

$Fk_{p,j}$ $Mst_{p,j}$	$Fk_p = \sum_{j=1}^n [Fk_{p,j} * (1 + Rfgkzs_j) + Mst_{p,j} * Mss_j]$ (11)	$Fk_p$
---------------------------	----------------------------------------------------------------------------	--------

mit	$Mst_{p,j}$	Maschinenstunden des Operators <sup>548</sup> des Transformationssystemes j des Produktes p	Ze
	$Rfgkzs_j$	Restfertigungsgemeinkostenzuschlagssatz des Operanden des Transformationssystemes j	%
	$Mss_j$	Maschinenstundensatz des Operanden des Transformationssystemes j des Produktes p	$\frac{\text{€}}{\text{Ze}}$

Somit dienen die Maschinenstunden, die Materialeinzelkosten und Fertigungslohnkosten des jeweiligen Transformationssystemes als Datenbasis zur Berechnung der Kosten nach dem Modell der differenzierenden Zuschlagskalkulation. Zur Bestimmung der

<sup>541</sup> Auf die Verwaltungsgemein- und Vertriebskosten wird im Weiteren nicht eingegangen. Sie sind nach VDI 2225 Blatt 1, S. 9 für die Produktentwicklung „[...] seltener von Interesse [...]“. Sie werden durch die Multiplikation der Bearbeitungskosten mit den jeweiligen Zuschlagfaktoren berechnet.

<sup>542</sup> VDI 2234, S. 25; Schweitzer und Küpper 2011, S. 173; Plinke und Rese 2006, S. 122ff.

<sup>543</sup> Horsch 2010, S. 111

<sup>544</sup> Die Maschinenkosten je Ze können nach REFA 1976a, S. 38 zu Maschinenkosten je Stück über die Betriebsmittelzeit je Stück aus der Division aus Belegungszeit und der Anzahl der Stücke umgerechnet werden.

<sup>545</sup> VDI 2234, S. 11; VDI 2234, S. 25; Horsch 2010, S. 140; REFA 1976a, S. 36

<sup>546</sup> REFA 1976a, S. 36f.

<sup>547</sup> VDI 2234, S. 26f.

<sup>548</sup> Aus prozessualer Sicht nach Abschnitt 2.1.1 wird jedem Prozess ein Operator in Form einer Maschine bzw. eines Arbeits- oder Betriebsmittels zugewiesen.

Gemeinkostenzuschläge wird der Betriebsabrechnungsbogen verwendet.<sup>549</sup> Sämtliche Zuschläge für Maschinenstunden oder die Gemeinkosten werden „willkürlich“ festgelegt.<sup>550</sup> Für die Berechnung der Gemeinkosten werden Kostenarten, wie Raum-, Sozial-, Energie- oder Instandhaltungskosten berücksichtigt.<sup>551</sup> Ähnlich verhält es sich mit den Maschinenstundensätzen. Sie werden über die Kostenarten *kalkulatorische Abschreibungen* und *Zinsen, Raum-, Energie- und Instandhaltungskosten* berechnet.<sup>552</sup> Keine der Kostenarten, sowohl zur Berechnung der Gemeinkostenzuschläge als auch der Maschinenstundensätze, entsprechen Aktionsparametern der Produktentwicklung. Sie stehen mit den unabhängigen bzw. abhängigen Eigenschaften des Produktes nicht in Verbindung.<sup>553</sup>

### 3.2.2.1.2 Das Partialmodell des Umsatzes während des Marktzyklus

Ein zu entwickelndes Produkt ist im Vergleich zu einem Referenzprodukt ökonomisch nachhaltiger, wenn die Liquidität bzw. die Einnahmen flüssiger Mittel oder der Gewinn (vgl. Abschnitt 2.2.1.2) höher sind. Die Einnahmen flüssiger Mittel bzw. der Umsatz bzw. der Erlös, z. T. auch als Leistungswert oder Umsatzerlös bezeichnet,<sup>554</sup> beschreibt den positiven Nominalgüterfluss von dem Absatzmarkt in die Ökonosphäre. Formel (12) beschreibt das Partialmodell des Umsatzes.

$$U_p = \sum_{z=1}^n S_{p,z} * N_z * \Delta t_z = N * s_{p,p} \quad (12) \quad U_p$$

mit	$U_p$	Umsatz eines Produktes p	€
	$S_{p,z}$	Stückpreis eines Produktes p während des Zeitintervalles z des Marktzyklus	$\frac{\text{€}}{\text{Menge}}$
	$N_z$	Nachfrage während des Zeitintervalles z des Marktzyklus	$\frac{\text{Menge}}{\text{Ze}}$
	$\Delta t_z$	Länge des Zeitintervalles z des Marktzyklus	Ze
	$N$	Abgesetzte Menge (Me) bei konstantem Mengenpreis	Me
	$s_{p,p}$	Spezifischer zeitunabhängiger Mengenpreis	$\frac{\text{€}}{\text{Me}}$

Der Umsatz ist abhängig von dem Stückpreis des Produktes, der abgesetzten Stückzahl in dem betrachteten Zeitraum und der Länge des betrachteten Zeitraumes. Das

<sup>549</sup> REFA 1976a, S. 23

<sup>550</sup> u. a. VDI 2234, S. 13; Möller et al. 2011, S. 212; Posluschny 2010, S. 120

<sup>551</sup> REFA 1976a, S. 23ff.

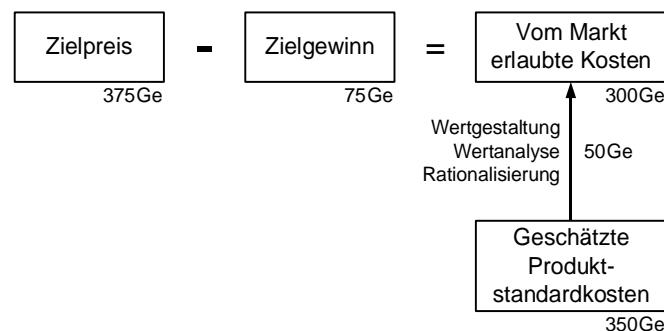
<sup>552</sup> REFA 1976a, S. 37

<sup>553</sup> An der Stelle wird der Unterschied zwischen dem allgemeinen Verständnis bzw. der Interpretation von Modellen und den modellspezifischen Verkürzungsmerkmalen deutlich. VDI 2235, S. 13 sieht den Einfluss der Produktentwicklung auf den Gemeinkostenanteil in den Aspekten der Materialwirtschaft, der Arbeitsvorbereitung und der festgelegten Teilevielfalt. Zum einen berücksichtigen die Gemeinkosten keinen dieser Aspekte. Zum anderen gehören die Materialwirtschaft und die Arbeitsvorbereitung nach Hubka 1976, S. 6f. nicht zum Unternehmensbereich der Produktentwicklung. Die Teilevielfalt fließt bei der Individualisierung der Zuschlagssätze durch das Partialmodell des Betriebsabrechnungsbogens evtl. über die Raum-, Personal- und Fertigungskosten durch die Handhabung ein. Der Produktentwicklung steht somit kein Partialmodell zur Verfügung, mit dessen Hilfe die Wirkung der Änderungen bezüglich der Teilevielfalt auf Grundlage synthetisierter Indikatoren analysiert werden kann.

<sup>554</sup> VDI 2234, S. 28

Produkt aus dem Stückpreis des Produktes und der Nachfrage entspricht der Umsatzrate.<sup>555</sup> Das Produkt aus der nachgefragten bzw. abgesetzten Stückzahl und dem betrachteten Zeitraum ist die Verkaufsmenge. Sämtliche Variablen aus Formel (12) sind von der Marktsituation abhängig. Entsprechend steht der Produktentwicklung keine unabhängige und beeinflussbare Datenbasis zu dem Partialmodell zur Verfügung. Die abgesetzte Stückzahl und die Länge des Marktzyklus aus Formel (12) sind sowohl von der Produktart als auch von dem Käuferverhalten abhängig. Bei der Produktart hängt die Länge des Marktzyklus davon ab, ob es sich um ein kurz- oder langlebiges Produkt handelt. Das Käuferverhalten ist unter anderem vom Wertesystem der Zielgruppe und dem Marketing abhängig.

Der Stückpreis ist der kritische Erfolgsfaktor eines Unternehmens.<sup>556</sup> „Der Käufer oder ein Wettbewerber diktieren den Preis.“<sup>557</sup> Der Preis ist von dem im Unternehmen implementierten Kostenmodell der Ökonosphäre unabhängig und wird durch die Kostenplanung bestimmt.<sup>558</sup> Den Ausgangspunkt der Produktentwicklung bildet der Zielpreis, der „[...] unter Beachtung von Marktforschung, Konkurrenzanalysen und vor allem [!] Kundenwünschen festgelegt“<sup>559</sup> wird und für definierte Anforderungen an das Produkt gilt (vgl. Bild 3-6).<sup>560</sup> Er wird durch die Kalkulationsabteilung festgelegt.<sup>561</sup> Der Zielpreis wird als unbeeinflussbar angesehen.<sup>562</sup>



**Bild 3-6: Das Partialmodell zur Festlegung von Zielkosten durch die Kostenplanung<sup>563</sup>**

Er wird statisch festgelegt und ist unabhängig von der Entwicklung erzielbarer Preise während des Marktzyklus.<sup>564</sup> Dem Zielpreis gegenüber stehen die Zielkosten bzw. die vom Markt erlaubten Kosten. „An diesen einmal festgelegten Zielkosten orientiert sich

<sup>555</sup> I. d. R. wird bei Lebenszyklusbetrachtungen fälschlicherweise der Umsatz auf der Ordinate aufgetragen, aber gleichzeitig abnehmende Umsatzverläufe der Teilphasen der Marktsättigung und der Marktdegeneration während des Marktzyklus angegeben. Daher wird in dieser Arbeit die Umsatzrate betrachtet, da sie und nicht der Umsatz in den genannten Teilphasen des Marktzyklus abnimmt. Der Umsatz entspricht dem Integral der evtl. zeitlich veränderlichen Umsatzrate über den Lebenszyklus des Produktes bzw. der Summation nach Formel (12) bei linear angenommener Stückpreis- und Nachfrageentwicklung während eines Zeitintervalles.

<sup>556</sup> Gausemeier et al. 2001, S. 62

<sup>557</sup> Mörtl 2012, S. 708, ein Markt wird als Käufermarkt bezeichnet, wenn die Preise durch die Kunden oder Wettbewerber diktiert wird. Nach Mörtl 2012, S. 708 bewegen sich Unternehmen hauptsächlich in einem Käufermarkt.

<sup>558</sup> Horváth et al. 1993, S. 3; Seidenschwarz 1993, S. 31ff.; VDI 2225 Blatt 1, S. 8f.

<sup>559</sup> Horváth et al. 1993, S. 10

<sup>560</sup> Horváth et al. 1993, S. 10

<sup>561</sup> a. a. O. Fn. 387

<sup>562</sup> Gaiser und Kieninger 1993, S. 64

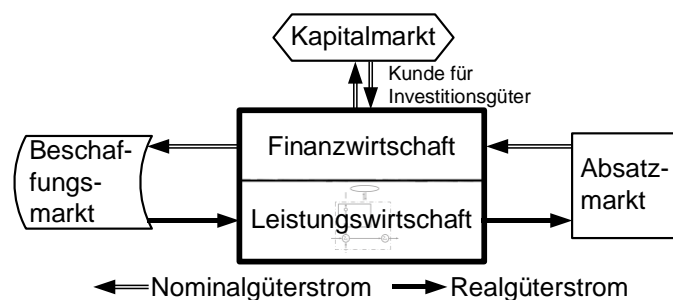
<sup>563</sup> Horváth et al. 1993, S. 12

<sup>564</sup> Frank 1997, S. 279

der gesamte weitere Verlauf der Produktentwicklung.“<sup>565</sup> Sie ergeben sich aus der Differenz zwischen Zielpreis und dem Zielgewinn.<sup>566</sup> Die Zielkosten einzelner Teilfunktionen werden durch eine Paretoanalyse auf die Zielkosten einzelner Bauteile runtergebrochen.<sup>567</sup> Die Produktentwicklung hat die Aufgabe, die Zielkosten für das Produkt zu erreichen. Sie entsprechen dem Nominalgüterfluss, der zur Erstellung der Leistung innerhalb der produktentwicklungsnahen Transformationssysteme nötig ist (vgl. Abschnitt 3.2.2.1.1). Dazu werden die geschätzten Produktstandardkosten bzw. die Selbstkosten als Referenz durch Methoden wie der Wertanalyse und der Wertgestaltung während der Produktentwicklung herabgesetzt.<sup>568</sup> Sind die Kostensenkungspotenziale in der Produktentwicklung ausgeschöpft, werden weitere Maßnahmen wie die Rationalisierung auf der Produktionsplanungs- und -durchführungsebene ergriffen.<sup>569</sup> Scheitern die Bemühungen wird das Produkt am Absatzmarkt nicht angeboten. Für die weitere Arbeit werden die Annahmen, dass sowohl die Zielkosten als auch sämtliche „klassischen“ Anforderungen wie die hochwertige Produktqualität und eine termingerechte Verfügbarkeit des Produktes nach Abschnitt 2.1 erfüllt worden sind, vorausgesetzt. Die ermittelten Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt spiegeln die Anforderungen des Kunden, des Nutzenden und des produktentwicklungsnahen Unternehmens wider. Die Produktentwicklung läuft „optimal“ ab und führt zu einem am Markt termingerecht absetzbaren Produkt.

### 3.2.2.2 Das Partialmodell der Ökonosphäre des Kunden für Investitionsgüter

Aus Sicht des Kunden des zu entwickelnden Investitionsgutes entspricht der Absatzmarkt des produktentwicklungsnahen Unternehmens dem eigenen Beschaffungsmarkt (vgl. Bild 3-7). Das Investitionsgut wird als Operator in den leistungswirtschaftlichen Prozessen verwendet.



**Bild 3-7: Das betriebswirtschaftliche Partialmodell des Kunden für Investitionsgüter**

Für den Kunden des Investitionsgutes ergibt sich entsprechend eine andere Spezialisierung der monetären Ein- und Ausgänge nach Formel (6) als bei dem produktentwicklungsnahen Unternehmen. Wie bereits in Abschnitt 3.2.2.1.2 beschrieben, ist der

<sup>565</sup> Ehrlenspiel et al. 2013, S. 58

<sup>566</sup> Horváth et al. 1993, S. 10ff.

<sup>567</sup> Ehrlenspiel et al. 2013, S. 82ff.

<sup>568</sup> Horváth et al. 1993, S. 17; Horváth 1993, S. 230

<sup>569</sup> Horváth et al. 1993, S. 16

Stückpreis und damit die Beschaffungskosten für das Investitionsgut durch die Kostenplanung des produktentwicklungsnahen Unternehmens vorgegeben.<sup>570</sup> Dieser Sachverhalt gilt ebenfalls für die durch das Investitionsgut veredelten Materialien. Die Datenbasis zur Abschätzung des Einflusses auf den nachhaltigen ökonomischen Zustand des Kunden durch den Nutzungsprozess des Investitionsgutes bilden somit die Kosten für die Inbetriebnahme, die Benutzung, die Wartung bzw. Reparaturen und die Außerbetriebnahme (vgl. Bild 3-3). Der Einsatz des Investitionsgutes kann sowohl einem produktentwicklungsnahen als auch einem -fernen Fabrikationsprozess entsprechen.

Die Nutzungskosten werden über die bereits in Abschnitt 2.2.1.2 erwähnten Methoden mit den entsprechenden Partialmodellen nach VDI 2884 bzw. dem VDMA-Einheitsblatt 34160<sup>571</sup> synthetisiert.<sup>572</sup> Die dort beschriebenen Kostenmerkmale können je nach Anspruchsgruppe nach dem Ausarbeiten als Grundlage für Angebote seitens des produktentwicklungsnahen Unternehmens an den Kunden genutzt werden<sup>573</sup> oder dem Kunden als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl zwischen unterschiedlichen Investitionsgütern dienen<sup>574</sup>. VDI 2884 erhebt zwar den Anspruch der „[...] Unterstützung einer wirtschaftlichen und kundenorientierten Planung und Entwicklung von Produktionsmitteln“<sup>575</sup>, gleichzeitig beschränkt sie sich auf die „Beschaffung von Produktionsmitteln unter Anwendung von LCC“<sup>576</sup><sup>577</sup>. Der ökonomisch nachhaltigere Zustand eines Kunden von Investitionsgütern ist dann erreicht, wenn beim Vergleich zwischen mehreren Investitionsgütern gleicher Rahmenbedingungen und Grunddaten<sup>578</sup> die Entscheidung auf das Investitionsgut mit dem höchsten Verhältnis zwischen dem Zielgewinn durch die Materialveredelung und den Kosten des Nutzungsprozesses fällt. Die Aufgabe der Produktentwicklung ist somit, die monetären Ausgänge des Kunden eines Investitionsgutes in Form der Nutzungskosten zu senken. Die Kosten für die Nutzung des zu entwickelnden Produktes sind von der Produktart abhängig.<sup>579</sup> Sie werden nach FELDHUSEN ET AL. für ein Jahr auf Grundlage von bestehenden Produkten und Erfahrungen innerhalb des eignen Unternehmens antizipiert und auf die in den Anforderungen definierte Nutzungszeit hochgerechnet.<sup>580</sup> Ein Antizipieren der Nutzungskosten bzw. der sog. Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership-TCO)

---

<sup>570</sup> Der Stückpreis aus Sicht des eignen Unternehmens kann sich durch Handelsspannen von Zwischenhändlern, Kosten für Transporte usw. von den Beschaffungskosten des Kunden unterscheiden.

<sup>571</sup> Die Methode zur Ermittlung der Maschinenstundensätze nach Abschnitt 3.2.2.1.1 ist aufgrund der Willkür der Festlegung und der Datenbasis real existierender Buchführungssysteme für eine Synthese der Kostenmerkmale von zu entwickelnden Produkten nicht geeignet.

<sup>572</sup> Die Partialmodelle sind bei VDI 2884, S. 12ff. bzw. VDMA 34160, S. 3ff. zu finden.

<sup>573</sup> VDMA 34160, S. 5

<sup>574</sup> VDMA 34160, S. 5; VDI 2884, S. 3

<sup>575</sup> VDMA 34160, S. 3

<sup>576</sup> Life-Cycle-Costing bzw. Lebenszykluskostenrechnung

<sup>577</sup> VDI 2884, S. 6ff.

<sup>578</sup> Analog zu der Ökobilanz schlägt VDMA 34160, S. 5 ein Synthetisieren der funktionalen Einheit über sog. Rahmenbedingungen wie Lastzyklen und Grunddaten wie Nutzungszeiträumen, Belegungszeiten, Produktionsleistungen oder Ausschussquoten als Vergleichsgrundlage von Investitionsgütern vor.

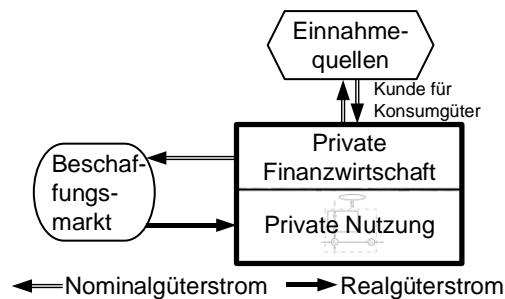
<sup>579</sup> Ehrlenspiel und Merkmann 2013, S. 658f.

<sup>580</sup> Feldhusen et al. 2013b, S 131ff.

kann in Zukunft ebenfalls über die in TCO-Verträgen angegebenen Anforderungen des Kunden erfolgen.<sup>581</sup>

### 3.2.2.3 Das Partialmodell der Ökonosphäre des Kunden für Konsumgüter

Konsumgüter dienen ausschließlich der Befriedigung von Bedürfnissen in Privathaushalten.<sup>582</sup> Bei Konsumgütern geben „[...]“ oft diffuse emotionale Gründe den Ausschlag bei einer Kaufentscheidung.“<sup>583</sup> Expressive Produktfunktionen sind wichtiger als die utilitaristischen Funktionen des Produktes.<sup>584</sup> Kaufentscheidungen werden seltener aufgrund der Produkteigenschaften getroffen. Sie sind von Faktoren wie dem privaten Umfeld oder der Bewertungen durch andere Kunden oder Verbraucherorganisationen und dem Marketing abhängig. Im Gegensatz zu den Investitionsgütern ist der monetäre Eingang des Kunden von der privaten Nutzung von Konsumgütern unabhängig (vgl. Bild 3-8).



**Bild 3-8: Das betriebswirtschaftliche Partialmodell des Kunden für Konsumgüter**

Die monetären Einnahmequellen von Privathaushalten sind Gehälter durch die Bereitstellung des Humankapitals für leistungswirtschaftliche Prozesse (vgl. Abschnitte 2.2.1.3 und 3.1), staatliche Leistungen oder Einkünfte aus Privatvermögen. Die monetären Ausgänge sind analog zu Investitionsgütern die Kosten für den Kauf, die Inbetriebnahme, die Benutzung, die Wartung bzw. Reparaturen und die Außerbetriebnahme des zu entwickelnden Produktes (vgl. Bild 3-3). Der Kaufpreis wird durch die Kostenplanung des jeweiligen Unternehmens des Beschaffungsmarktes vorgegeben (vgl. Abschnitt 3.2.2.1.2).

Die Nutzungskosten sind zum einen von der Produktart und den Unternehmenstypen<sup>585</sup> abhängig. Bei Konsumgütern, die beispielsweise den Anbindungseffekt nutzen, auch *Lock-in-Effekt* genannt,<sup>586</sup> sind die Kosten für den Kauf geringer als die Folgekosten. Bei passiven Produkten ohne Energie- oder Materialumsatz<sup>587</sup> überwiegen die Kosten für den Kauf. Die Nutzungskosten sind zum anderen von dem Nutzerverhalten

<sup>581</sup> Albrecht und Wetzel 2009, S. 82ff. beschreiben das Verfahren der TCO-Vertragserstellung. Zunächst sind TCO-Werte wie die mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen, mittlere Ersatzteilkosten und mittlere Reparaturzeiten in den Verträgen erfasst worden. In Zukunft sollen auch Energiekosten berücksichtigt werden.

<sup>582</sup> Herdzina und Seiter 2011, S. 4

<sup>583</sup> Ehrlenspiel et al. 2013, S. 31.

<sup>584</sup> Mittal 1988, S. 500

<sup>585</sup> Petersen et al. 2015, S. 6ff.

<sup>586</sup> Raff 2000, S. 24ff.

<sup>587</sup> Birkhofer et al. 2012, S. 565

abhängig und nicht uneingeschränkt antizipierbar (vgl. Abschnitt 3.1.4). Beispielsweise sind bis zu 25 % des Kraftstoffverbrauches eines Pkw durch die Fahrweise bedingt,<sup>588</sup> ein gepflegtes und nachweislich gewartetes Fahrzeug hat zudem einen höheren Restwert und geringere Verbrauchswerte als vernachlässigte Fahrzeuge.<sup>589</sup> Zu welchen Diskrepanzen der Nutzungskosten eine Abweichung zwischen dem antizipierten und dem realen Nutzerverhalten bei der Entwicklung von Konsumgütern führt, zeigen einige Beispiele aus den Medien.<sup>590</sup> In Verbindung mit dem EU-Energielabel für Kühlschränke beispielsweise führt das Nutzerverhalten zu signifikanten Abweichungen von dem antizipierten Energieumsatz und damit den Einsatzkosten.<sup>591</sup> Eine noch häufiger diskutierte Diskrepanz ist die Verbrauchsangabe bei Personenkraftwagen über den antizipierten Fahrzyklus.<sup>592</sup>

### 3.2.2.4 Das Partialmodell der Ökosphäre des Beschaffungsmarktes

Die Unternehmen des Beschaffungsmarktes stehen in vielseitigen Wechselwirkungen zu produktentwicklungsnahen Bearbeitungsprozessen. Ihr ökonomischer Erfolg als Zulieferer von Betriebsstoffen, Fertigteilen oder Baugruppen ist von den Aufträgen des produktentwicklungsnahen Unternehmens abhängig.<sup>593</sup> Die Unternehmen des Beschaffungsmarktes können gleichzeitig Abnehmer des produktentwicklungsnahen Transformationssysteme sein (vgl. Bild 3-9).

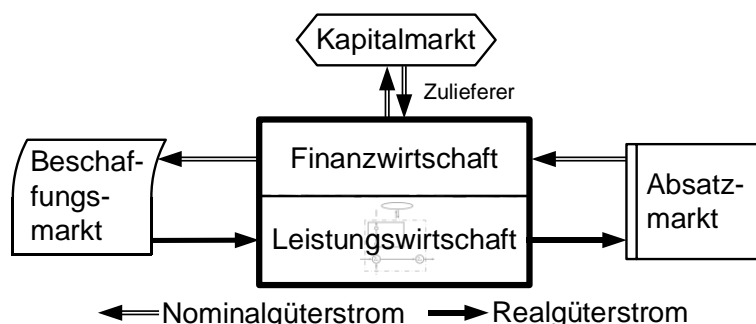


Bild 3-9: Das betriebswirtschaftliche Partialmodell des Zulieferers

Die Automobilhersteller zum Beispiel versteigern Neuschrotte der Bearbeitung an die Stahlhersteller.<sup>594</sup> Die Stahlhersteller verrechnen den Wert des Neuschrottes nach der Rückführung als Gutschrift auf die Bestellungen.<sup>595</sup> Somit hängt die Nachfrage des Zulieferers direkt mit der Menge zurückgeführter Nebenerzeugnisse der produktentwicklungsnahen Transformationssysteme zusammen.<sup>596</sup> Der Verkauf von absetzbaren

<sup>588</sup> Verband der Automobilindustrie e. V. und Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller e. V. 2012, S. 3

<sup>589</sup> Verband der Automobilindustrie e. V. und Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller e. V. 2012, S. 3; Bruner-Newton und Lenz 1981, S. 73ff. führen den Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Kraftstoffverbrauch und damit die Einsatzkosten auf.

<sup>590</sup> Es wird nicht näher auf die Rolle der Unternehmen und die vermeintliche Ausnutzung von unklar definierten Randbedingungen zur Ermittlung von Kennzahlen durch Normen und Richtlinien eingegangen.

<sup>591</sup> Bohne 2014, S. 40

<sup>592</sup> Schwarzer 2014, Kirchner 2007, S. 95f., ADAC 2014 und Dings 2013, S. 21ff. zeigen explizit Maßnahmen der Fahrzeugproduzenten bei der Ermittlung der Kennzahlen auf, die zu einer Abweichung des antizipierten und realen Nutzungsprozesses führen.

<sup>593</sup> Trares 2008, S. 1ff.

<sup>594</sup> Pilarsky 2014, S. 90

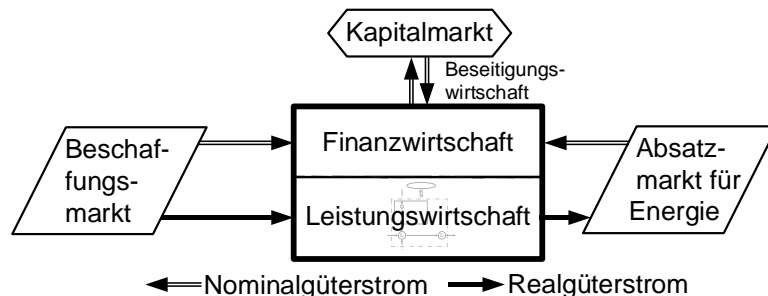
<sup>595</sup> Hardt 2011, S. 158

<sup>596</sup> Platts-McGraw Hill Financial 2011

Nebenerzeugnissen der Bearbeitung führt zu weiteren Umsätzen des produktentwicklungsnahen Unternehmens,<sup>597</sup> der bezüglich Formel (12) und der Unterscheidung von Stoffen und Gegenständen nach Abschnitt 3.1 über einen Grundpreis und die abgesetzten Menge berechnet wird. Die Rückvergütung erfolgt i. d. R. über einen niedrigeren Grundpreis im Vergleich zum fabrikneuen Material, was eine negative Wertschöpfung darstellt.<sup>598</sup> Somit hat die Produktentwicklung über die unabhängigen Material- und Gestalteigenschaften Einfluss auf die Ökonosphäre der Zulieferer. Das betrifft nicht nur die Wahl der Materialart für das zu entwickelnde Produkt. Auch die anfallenden Nebenerzeugnisse der produktentwicklungsnahen Bearbeitungsprozesse nehmen Einfluss auf den ökonomischen Erfolg der Zulieferer. Beispielsweise kann ein stagnierendes Angebot von Nebenerzeugnissen am Beschaffungsmarkt des Zulieferers zu Rationalisierungsmaßnahmen führen.<sup>599</sup>

### 3.2.2.5 Das Partialmodell der Ökonosphäre der Beseitigungswirtschaft

Die Wechselwirkungen zwischen den Anspruchsgruppen sämtlicher Transformationssysteme des Produktlebenslaufes und der Beseitigungswirtschaft nimmt innerhalb der ökonomischen Betrachtung aufgrund des Verursachungsprinzipes eine Sonderstellung ein. Im Gegensatz zu den anderen Anspruchsgruppen bzw. Lebenslaufprozessen sind bei der Beseitigungswirtschaft die Nominal- und Realgüterflüsse des Beschaffungsmarktes gleichläufig (vgl. Bild 3-10). Sämtliche Stoffe des Produktlebenslaufes, die keiner Verwendung oder Verwertung zugeführt werden, werden beseitigt.



**Bild 3-10: Das betriebswirtschaftliche Partialmodell der Beseitigungswirtschaft am Beispiel Abfallverbrennung**

Kunden verrichten einen Nominalgüterfluss an die Beseitigungswirtschaft durch Abfallgebühren. Gefährliche Abfälle oder Sonderabfall nach der *Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV)*<sup>600</sup> rufen höhere Kosten als „ungefährlicher“ Abfall hervor. Die leistungswirtschaftlichen Prozesse entsprechen der Deponierung oder Verbrennung (vgl. Abschnitt 3.1.5). Bei einer eventuellen Verbrennung wird thermische oder elektrische Energie abgesetzt. Die Produktentwicklung hat über den Stofffluss zur Beseitigung Einfluss auf die Ökonosphäre der Beseitigungswirtschaft. Eine Abfallvermeidung, bei-

<sup>597</sup> Statistisches Bundesamt 2015b, S. 317

<sup>598</sup> Burger 2012, S. 4

<sup>599</sup> Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. 2009, S. 2; Burgmaier 2010

<sup>600</sup> AVV 2015, S. 29ff.

spielsweise durch die Einführung des Pfandes für Einwegverpackungen und ihre Verwertung (vgl. Abschnitt 3.2), hat ökonomische Wirkungen auf die Beseitigungswirtschaft, da beispielsweise Energieträger verloren gehen.

### 3.2.3 Das Partialmodell der Soziosphäre

Das Verständnis der Gesellschaft gibt aus Gründen der Konsistenz zwischen den Partialmodellen der Nachhaltigkeitssphären untereinander und der Abgrenzung über ähnliche Sozialstrukturen (vgl. Abschnitt 2.2.1.3) das Verkürzungsmerkmal für die Betrachtungsgrenzen sämtlicher Transformationssysteme vor.<sup>601</sup> Für diese Arbeit wird die Systemgrenze ähnlicher Gesellschaften für Länder mit *hohem* oder *sehr hohem Index für menschliche Entwicklung (Human Development Index-HDI)* des *Entwicklungsprogramms der Vereinten Nationen* nach MALIK gesetzt.<sup>602</sup> Das Partialmodell des HDI berücksichtigt die Lebenserwartung, die Bildung und das Einkommensniveau<sup>603</sup> und wird in dieser Arbeit als Indikator für ähnliche Gesellschaften, die auch als Erste Welt oder Industriestaaten bezeichnet werden können, herangezogen.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1.3 beschrieben, ist für die Erfassung des Einflusses der Produktentwicklung auf die Soziosphäre über die Transformationssysteme aufgrund des Standes der Technik der Pragmatismus anzuwenden. Über die „klassischen“ Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt werden aus Sicht der Produktentwicklung bereits Teilaspekte der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit abgedeckt. Ein zu entwickelndes Produkt ist gesellschaftlich nachhaltiger, wenn die Transformationssysteme im Vergleich zu einer Referenz bessere Indikatorwerte erreichen.<sup>604</sup> Als Indikatorwert hat sich auf sämtlichen Aggregationsebenen das Beschäftigungsniveau bzw. die für die zweckdienliche Änderung des Operanden innerhalb des Transformationssystemes personengebundene Leistung herauskristallisiert.<sup>605</sup> Dabei steht der Zusammenhang des Transformationssystemes mit den dafür nötigen personengebundenen Leistungen bzw. dem dafür nötigen Humankapital durch die Wirkung auf das Sozialkapital im Vordergrund. BERKMAN UND GLASS weisen darauf hin, dass die brückenbildende Mesebene des Sozialkapitals die bindende Makroebene, welche einen Zugang zu dem Humankapital ermöglicht, bedingt.<sup>606</sup> THENEN ET AL. stellen in einer empirischen Untersuchung einen Zusammenhang zwischen der Arbeitslosenquote europäischer Gebietseinheiten und dem Sozialkapital her.<sup>607</sup> Als Datenbasis zur Berechnung des So-

<sup>601</sup> Das bedeutet nicht, dass aufgrund unterschiedlicher normativer Sozialstrukturen eine Berücksichtigung von den vorhandenen Partialmodellen abweichender Sozialstrukturen nicht möglich ist. Die vorhandenen und in dieser Arbeit vorgestellten Indikatorsysteme der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit sind von den jeweiligen Gesellschaften, in denen sie erarbeitet worden sind, geprägt (Abschnitt 2.2.1.3). Für jede Gesellschaftsform gelten andere Indikatoren bzw. Gewichtungen zur Indizierung des gesellschaftlich nachhaltigen Zustandes.

<sup>602</sup> Malik 2014, S. 160f.

<sup>603</sup> Sen und Anand 1994, S. 7ff.

<sup>604</sup> Schmidt et al. 2004, S. 82

<sup>605</sup> Healy et al. 2001, S. 39 unterscheiden das Human- von dem Sozialkapital über Investitionen von Zeit und Mühe in soziale Interaktionen. Das Humankapital wird analog als eine Investition von Zeit und Mühe für die Durchführung von Fabrikationsprozessen verstanden.

<sup>606</sup> Berkman und Glass 2000, S. 149

<sup>607</sup> Thenen et al. 2006, S. 46

zialkapitales dienen auf Mikroebene das Vertrauen zu anderen Menschen und auf Makroebene die Mitgliedschaften in Vereinen.<sup>608</sup> Es ist eine negative Korrelation zwischen der Arbeitslosenquote und dem Sozialkapital festgestellt worden.<sup>609</sup> Daher wird für diese Arbeit, auch in Anlehnung an Abschnitt 2.2.1.3, vorausgesetzt, dass die gesellschaftliche Nachhaltigkeit eines Transformationssystemes von der personengebundenen Leistung, die benötigt wird, abhängig ist. Aufgrund des sozialwissenschaftlichen Forschungsstandes ist eine quantitative Synthese des Sozialkapitals auf Grundlage der für die Transformationssysteme benötigten personengebundenen Leistung und damit die Analyse der Wirkung auf die Soziosphäre durch Indikatoren nicht möglich.

ĆORIĆ ET AL. beschreiben zur Abschätzung des Indikatorwertes der Produktentwicklung auf die Soziosphäre ein mit der Ökobilanz konsistentes materialflussbasiertes Partialmodell nach Formel (13)<sup>610</sup> zur Berechnung von Beschäftigungszahlen eines Wirtschaftszweiges oder eines Akteurs innerhalb des Produktlebenslaufes.<sup>611</sup>

$\dot{M}_{i,j}$	$A_j = \sum_{i=1}^n \dot{M}_{i,j} * \frac{1}{kA_i} \quad (13)$	$A_j$
-----------------	----------------------------------------------------------------	-------

mit	$A_j$	Anzahl der Anwendenden eines Transformationssystemes j	-
	$\dot{M}_{i,j}$	Fluss eines Materiales i eines Transformationssystemes j	$\frac{\text{kg}}{\text{Ze}}$
	$kA_i$	Umsatz des Materiales i des Anwendenden	$\frac{\text{kg}}{\text{Ze}}$

Als Beispiel wird das alternative Verwenden von Metallverschnitt herangezogen (vgl. Abschnitt 5). Im Folgenden wird konsistent zum Partialmodell der Technosphäre nach Abschnitt 3.1 die Kategorisierung von Transformationssystemen nicht anhand von Wirtschaftszweigen, Akteuren oder Anspruchsgruppen vorgenommen, sondern auf Basis antizipierbarer Transformationssysteme. Die Modellbildung in der Prozessbetrachtung nach Abschnitt 2.1.1 wird je nach Zweck der Nachhaltigkeitsuntersuchung entsprechend durch Systemgrenzen, Annahmen und Randbedingungen verkürzt. Daher ist die Modellierung von Transformationssystemen auf den Abstraktionsebenen von Wirtschaftszweigen, einzelnen Akteuren, Prozessen oder Verfahren bzw. Operatoren möglich.

Der Massenumsatz aus Formel (13) entspricht der aus der Betriebswirtschaft bekannten Kennzahl der Arbeitsproduktivität.<sup>612</sup> Dabei ist die Arbeitsproduktivität von der

<sup>608</sup> Thenen et al. 2006, S. 47

<sup>609</sup> Thenen et al. 2006, S. 52

<sup>610</sup> Formel (13) ist Becker et al. 2009, S. 27 entnommen. Sie ist in der Erstveröffentlichung fehlerhaft angegeben und durch Ćorić et al. 2015, S. 1516 korrigiert worden. Hier erfolgt eine Verkürzung um den Beschäftigungsindex  $V_j$ . Er erfasst nach Becker et al. 2009, S. 26 den Anteil der Beschäftigten einer Branche, eines Akteurs oder einer Wertschöpfungsstufe j, die ausschließlich ihre Arbeitsproduktivität dieser Wertschöpfungsstufe zur Verfügung stellen. Bei der prozessualen Betrachtung nach Abschnitt 2.1.1 ist eine Allokation der Arbeitsproduktivität inkonsistent.

<sup>611</sup> Ćorić et al. 2015, S. 1515ff.

<sup>612</sup> REFA 1976b, S. 34

Technologie der eingesetzten Operatoren abhängig. Beispielsweise hat die Verdrängung des Block- durch das Stranggießen eine Verringerung der Beschäftigten um ca. 50% in dem Wirtschaftszweig der Halbzeugfertiger in den 1980-ern in den USA zur Folge gehabt.<sup>613</sup> Zur weiteren Spezialisierung der Arbeitsproduktivität wird die benötigte Zeit mit Bezug zu der Mengeneinheit  $1^{614}$  für die Transformation herangezogen.<sup>615</sup> Auf der Ebene von Operatoren werden nach VERBAND FÜR ARBEITSGESTALTUNG, BETRIEBSORGANISATION UND UNTERNEHMENSENTWICKLUNG (ehemals *Reichsausschuss für Arbeitszeitregelung-REFA*) und DIETRICH UND TSCHÄTSCH durch Partialmodelle personengebundene Leistungen durch eine Hauptzeitberechnung individualisiert.<sup>616</sup> Die Individualisierung erfolgt durch Prozessparameter des Operators sowie dem Werkstück als Operanden, seinen fertigungstechnischen Eigenschaften<sup>617</sup> und dem Unterschied zwischen den Eigenschaften des Operanden vor und nach der Transformation. Der Stand des Wissens ermöglicht z. Z. keine Unterscheidung der Soziosphäre aus der Sicht unterschiedlicher Anspruchsgruppen analog zu Abschnitt 3.2.2. Unterschieden wird zwischen der Arbeitsproduktivität für einen Fabrikationsprozess oder für die private Nutzung eines Konsumgutes (vgl. Abschnitt 2.2.1.3). Nach THENEN ET AL. führt eine hohe Beschäftigungsquote und damit eine geringere Arbeitsproduktivität zu einem höheren Sozialkapital.<sup>618</sup> Nach der Annahme aus Abschnitt 2.2.1.3 führt eine hohe Arbeitsproduktivität und damit eine geringere zeitliche Aufwendung des Anwenders während der Nutzung von Konsumgütern ebenfalls zu einer Steigerung des Sozialkapitales. Beide Sachverhalte widersprechen sich hinsichtlich des Einflusses personengebundener Leistungen auf den gesellschaftlich nachhaltigen Zustand.

---

<sup>613</sup> Brock und Norwood 1985, S. 21f.

<sup>614</sup> Bei Mengen kann es sich um Stückzahlen von Gegenständen handeln oder um Gewicht bei Stoffen.

<sup>615</sup> Dieses Partialmodell ist ursprünglich durch VDI 2225 Blatt 1, S. 22f. nach REFA 1973, S. n. a. für die Ermittlung von Fertigungslohnkosten als Multiplikation des Stundenlohnes und der benötigten Zeit verwendet worden.

<sup>616</sup> Dietrich und Tschätsch 2014, S. 73ff.; REFA 1992, S. 267ff.

<sup>617</sup> Die fertigungstechnischen Eigenschaften eines Gegenstandes werden in dieser Arbeit mit den technologischen Eigenschaften Umformbarkeit, Zerspanbarkeit, Fügbarkeit, Lackierbarkeit und Schweißignung nach Läßle 2010, S. 16, Ignatowitz 2011, S. 12 bzw. Conrad 2013, S. 548 f gleichgesetzt.

<sup>618</sup> Thenen et al. 2006, S. 52

## 4 Die Methodik der Nachhaltigkeitsbilanz

Die Möglichkeit, Nachhaltigkeitsindikatorwerte über antizipierte Transformationssysteme zu synthetisieren, ist von den jeweiligen Produktmodellen und dem informativem Abstand abhängig. Im Teilprozess *Klären der Aufgabenstellung* erfolgt kein Antizipieren der Folgen festgelegter Anforderungen hinsichtlich der Nachhaltigkeitskriterien, auch wenn Anforderungen bezüglich derselben festgelegt werden.<sup>619</sup> Sie werden ohne eine Analyse ihrer Wirkung, einschließlich der Kompensationseffekte, auf die Nachhaltigkeitssphären festgelegt (vgl. Abschnitt 2.1 und 2.2.2). Erst während des Konzipierens werden durch die Synthese von geeigneten Wirkstrukturen Material- und Energieflüsse in der Technosphäre beeinflusst. Der physikalische Effekt legt erste Rahmenbedingungen für energetische Wirkungsgrade eines zu entwickelnden Produktes während des Einsatzes fest (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die Materialeigenschaften und die Geometrie stehen hingegen mit der Rohstoffgewinnung und den verarbeitenden und bearbeitenden Transformationssystemen in Verbindung. Im Entwerfen werden Konzepte vollständig zu einem Entwurf synthetisiert, sämtliche mit dem Produkt und seinem Lebenslauf über Material- und Energieflüsse in Verbindung stehende Transformationssysteme sind antizipierbar.

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Nachhaltigkeitsbilanz von zu entwickelnden Produkten erläutert. Das Vorgehen ist an die Partialmodelle der Entwicklung nachhaltiger Produkte nach Abschnitt 3 angepasst und kann ab dem Konzipieren mit bereits vorhandenen prinzipiellen Lösungen in jedem Arbeitsschritt der Produktentwicklung angewendet werden. Das Vorgehen umfasst folgende Arbeitsschritte und bildet die Schnittmenge der Vorgehen nach der Ökobilanz<sup>620</sup>, dem MIPS<sup>621</sup> und dem kumulierten Energieaufwand<sup>622</sup>:

1. Definition des Zieles und des Untersuchungsrahmens
2. Antizipieren der Transformationssysteme
3. Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte
4. Analyse

Arbeitsschritt 2. repräsentiert die Sachbilanz als Teilprozess der Ökobilanz. Sie erfasst die antizipierte Technosphäre und die ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Flüsse wie Nominalgüter, Realgüter, personengebundene Leistungen, Energie usw. innerhalb der Technosphäre. Teilprozess 3. entspricht der Berechnung des Wirkungsindikatorwertes der Ökobilanz. Teilprozess 4. beinhaltet zum einen die Wirkungsabschätzung der Ökobilanz. Die strikte Trennung der Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte von der Analyse ist in dem Stand des Wissens begründet, da die Wirkung von Transformationssystemen auf die Soziosphäre wissenschaftlich nicht

---

<sup>619</sup> Nach Abschnitt 2.2.2 erlaubt das Individualmodell des zu entwickelnden Produktes in Form der Anforderungen im Teilprozess *Klären der Aufgabenstellung* kein Antizipieren deren Wirkung auf die Nachhaltigkeit, insbesondere unter Berücksichtigung des Kompensationseffektes.

<sup>620</sup> DIN EN ISO 14040, S. 22ff.

<sup>621</sup> Ritthoff et al. 2002, S. 17ff.

<sup>622</sup> VDI 4600, S. 15ff.

durchdrungen ist. Zum anderen wird im Teilprozess 4., analog zur Ökobilanz, die Auswertung durchgeführt. Sie ist der

„Bestandteil der Ökobilanz, bei dem die Ergebnisse der Sachbilanz oder der Wirkungsabschätzung oder beide bezüglich des festgelegten Ziels und Untersuchungsrahmens beurteilt werden, um Schlussfolgerungen abzuleiten und Empfehlungen zu geben.“<sup>623</sup>

Somit ist eine Analyse der Nachhaltigkeit des zu entwickelnden Produktes sowohl auf Basis der Nachhaltigkeitsindikatorwerte als auch auf Basis der Nachhaltigkeitsindikatoren möglich. Im Folgenden wird näher auf die Arbeitsschritte eingegangen.

#### 4.1 Definition des Zieles und des Untersuchungsrahmens

Der Aufwand der Nachhaltigkeitsbilanz ist von den festgelegten Zielen und Rahmenbedingungen abhängig. Das Ziel einer Nachhaltigkeitsbilanzierung während der Teilprozesse der Produktentwicklung ist die Bewertung alternativer Konzeptvarianten bzw. von Alternativentwürfen für Baugruppen oder Bauteile.<sup>624</sup> Die Zielgruppe stellt die an der Produktentwicklung beteiligten Personen dar. Der Untersuchungsrahmen wird durch den Stand der Produktentwicklung bzw. den Konkretisierungsgrad des zu entwickelnden Produktes festgelegt. Sowohl bei der Betrachtung von Konzeptvarianten gleicher Funktionsstrukturen als auch beim Vergleich unterschiedlicher Entwürfe für Bauteile bzw. Baugruppen ist eine funktionale bzw. prozessuale<sup>625</sup> Äquivalenz gegeben. Der Stand der Produktentwicklung legt über die Produktmodelle die verfügbare Datenbasis und damit die Betrachtungs- bzw. Systemgrenzen, Annahmen, Abschneidekriterien<sup>626</sup> und Einschränkungen fest. Aus Gründen der Konsistenz werden Betrachtungs- bzw. Systemgrenzen ebenfalls durch die Partialmodelle der Nachhaltigkeitsphären vorgegeben. Die Produktmodelle des Konzipierens verkürzen durch die funktionale und prinzipielle Betrachtung den Produktlebenslauf auf den Einsatz (vgl. Abschnitt 2.1.3). Eine Bewertung der Nachhaltigkeit der Fabrikationsprozesse erfolgt über die Materialflüsse, die durch die Realisierung der unabhängigen Eigenschaften der Wirkelemente bzw. -strukturen entstehen. Informationen über die Transformationssysteme des Werkstoffs zu den Fertigteilen bzw. entsprechenden Baugruppe liegen

<sup>623</sup> DIN EN ISO 14044, S. 8

<sup>624</sup> Nach Pahl et al. 2005, S. 487 sind Bewertungsmodelle sowohl im Teilprozess des Konzipierens als auch des Entwerfens anwendbar. Sie unterscheiden sich durch die zu verwendende Datenbasis.

<sup>625</sup> Die funktionelle Einheit der Ökobilanz als Beschreibung einer Betrachtungseinheit übertragen auf die Wirkung von Produkten auf die Nachhaltigkeit ist nicht nur sprachlich irreführend (vgl. Fn. 481). Transformationssysteme und nicht Funktionen rufen eine Wirkung auf die Sphären der Nachhaltigkeit hervor. Nach VDI 2221, S. 40 ist eine Funktion eine lösungsneutrale Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Ein- und Ausgangsgrößen“. Eine Funktion kann durch die allgemeinen Funktionen nach Abschnitt 2.1.3 modelliert werden. Ein Prozess erfüllt somit keine Funktion. DIN EN ISO 14040, S. 24 gibt die funktionale Einheit eines Händetrockners über die Anzahl getrockneter Handpaare an, was einem Ausgangszustand des Prozesses des Händetrocknens entspricht. Die Formulierung einer funktionalen Einheit bei der Ökobilanz zu Stahlprodukten „[...] Bereitstellung von 1000 kg warmgewalztem Stahl über 6 Lebenszyklen [...]“ nach Neugebauer und Finkbeiner 2012, S. 4 formuliert ebenfalls keine Funktion sondern den Ausgangszustand nach sechs Lebenszyklen. In Anlehnung an die Definition des Transformationssystemes nach Abschnitt 2.1.1 wird anstelle der funktionellen bzw. funktionalen in dieser Arbeit die zweck erfüllende oder prozessuale Einheit verwendet.

<sup>626</sup> DIN EN ISO 14040, S. 10

zu dem Zeitpunkt noch nicht vor. Durch das dem Wirkelement zugrunde liegende physikalische Prinzip sind ausschließlich Aussagen zum Einsatz möglich (vgl. Abschnitt 2.1.3). Aufgrund der Abstraktionsebene und des Informationsstandes ist eine Aussage über die Nachhaltigkeit nur über Teile des Produktlebenslaufes möglich. Durch die sukzessive Konkretisierung der individualisierten Produktmodelle wird während des Entwerfens die Datenbasis breiter und damit auch die Komplexität und der Umfang der nutzbaren Partialmodelle durch geringere Verkürzungen höher (vgl. Abschnitte 2.1.3 und 3.2).

## 4.2 Antizipieren der Transformationssysteme

Das Antizipieren der Transformationssysteme ist die Vorarbeit zur Durchführung der Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte. Die Modellierung erfolgt über die in Abschnitt 2.1.1 vorgestellten und in Abschnitten 3.1 und 4.5 abermals aufgegriffenen Abstraktionsebenen des Prozessmodelles nach HEIDEMANN. Es werden Transformationssysteme bestehend aus Einzelprozessen oder Prozessketten modelliert. Sie stellen sämtliche dem zu entwickelnden Produkt zuzuschreibende Transformationssysteme innerhalb der Technosphäre dar. Als Grundlage dient das in Abschnitt 3.1 vorgestellte Partialmodell der Technosphäre. Die Abstraktionsebene der Transformationssysteme der Rohstoffgewinnung, der Verarbeitung und Bearbeitung sowie der Nutzung und der Beseitigung hängt von dem Stand bzw. der Konkretisierungsebene der Produktentwicklung und von der Informationsverfügbarkeit entsprechend dem Dilemma der Produktentwicklung sowie dem informatorischen Abstand ab. Die Grenzen der Nachhaltigkeitsbilanzierung anhand der Produktkonkretisierung sind nicht fest. Beispielsweise steht bei manchen Entwicklungsaufgaben die Eigenfertigung bereits durch die im Unternehmen vorhandenen Betriebsmittel fest. Dies ist besonders bei Betriebsmitteln mit hohem Investitionsaufwand der Fall.

Das Ergebnis des Teilprozesses sind die spezifischen Material-, Energie- und Nebenflüsse, die durch den jeweiligen Konkretisierungsgrad des zu entwickelnden Produktes vorgegeben und durch das jeweilige Transformationssystem transformiert bzw. bereitgestellt werden. Spezifisch bedeutet in diesem Fall, dass sämtliche Eingänge oder Ausgänge von Flüssen auf den Eingangs- oder Ausgangsfluss des Materials, welches Teil des Produktes wird, bezogen werden. Dadurch wird eine Wiederverwendbarkeit bereits individualisierter Transformationssysteme und folglich eine Operationalisierbarkeit sichergestellt. Die Flüsse entsprechen beispielsweise den Mengen an Materialien bzw. Energien eines Transformationssystemes nach Formel (5), der Menge an Materialien, die Materialeinzelkosten hervorrufen bzw. Arbeitsleistung zur wirtschaftlichen Leistungserstellung benötigen. Sie repräsentieren die Materialien und Energien innerhalb der Technosphäre, die nach Bild 3-4 monetäre Ein- und Ausgänge hervorrufen und personengebundene Leistungen bedingen.

Die zu verwendende Datenbasis zum Antizipieren der Material-, Energie- und Nebenflüsse einzelner Transformationssysteme der Technosphäre ist von dem jeweiligen

Ziel und dem Untersuchungsrahmen abhängig. Beispielsweise können neben Recherchen oder bestehenden Datenbasen auch öffentlich zugängliche Datenbanken wie die *Prozessorientierten Basisdaten für Umweltmanagementsysteme (ProBas)* nach UMWELTBUNDESAMT<sup>627</sup>, der *ÖKOBAUDAT* nach BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB) oder Softwaretools wie *SimaPro* genutzt werden. Hier werden sämtliche relevanten Material-, Energie- und Nebenflüsse von Transformationssystemen ökobilanzkonform erfasst und quantifiziert.

### 4.3 Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte

Das Ziel dieses Teilprozesses der Nachhaltigkeitsbilanzierung ist die Bereitstellung der Nachhaltigkeitsindikatorwerte zur Analyse der Wirkung der Beeinflussung der Transformationssysteme durch die Produktentwicklung auf die Sphären der Nachhaltigkeit. Die Nachhaltigkeitsindikatorwerte werden analog zu den Wirkungsindikatorwerten der Ökobilanz nach Formel (1) über die antizipierten Transformationssysteme mit entsprechenden Partialmodellen zur Charakterisierung<sup>628</sup> nach Formel (14) individualisiert.

$aME_{i,j}$	$Nw_{j,s} = aME_{i,j} * C_{i,s}$ (14)	$Nw_{j,s}$
-------------	---------------------------------------	------------

mit	$Nw_{j,s}$	Nachhaltigkeitsindikatorwert eines Transformationssystemes j zur Nachhaltigkeitssphäre s
	$aME_{i,j}$	Antizipierte Menge eines Materials, einer Strecke oder Energie i des Transformationssystemes j
	$C_{i,s}$	Charakterisierungsfaktor eines Materials, einer Strecke oder einer Energie i zur Nachhaltigkeitssphäre s

Die Wirkung der Transformationssysteme auf die Nachhaltigkeit wird nach Abschnitt 3.2 durch die Material- bzw. Energieeingänge, die Wirkungsindikatorwerte für die Ökosphäre, die monetären Ein- und Ausgänge der Ökonosphäre und die nötige personengebundene Leistung und die Versorgungsleistung als Indikatorwerte für die Soziosphäre ermittelt. Welche Partialmodelle zur Individualisierung der Charakterisierungsfaktoren herangezogen werden, hängt sowohl von der Abstraktionsebene des Transformationssystemes und dem betrachteten Transformationssystem der Technosphäre als auch von den verfügbaren Informationen ab. Zur Synthese bzw. Individualisierung der ökologischen Nachhaltigkeitsindikatorwerte aus den antizipierten Material-, Energie- und Nebenflüssen wird im Folgenden auf die Material-Intensitäten nach WUPPERTAL INSTITUT FÜR KLIMA, UMWELT, ENERGIE<sup>629</sup> zurückgegriffen. Für die produktentwicklungsnahen Bearbeitungsprozesse stellt die Finanzwirtschaft (vgl. Kapitel 3.2.2.1) bzw. die Personaleinsatzplanung<sup>630</sup> des produktentwicklungsnahen Unter-

<sup>627</sup> Umweltbundesamt 2015

<sup>628</sup> analog zu DIN EN ISO 14044, S. 34ff.

<sup>629</sup> Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2014, S. 1ff.

<sup>630</sup> Zu dem Aufgabenbereich der Personaleinsatzplanung siehe Domsch 1980, S. 117ff., synonym wird nach Feldmann 2006, S. 14 der Begriff *Workforce Management* verwendet.

nehmens die Datenbasis für die Individualisierung der ökonomischen bzw. gesellschaftlichen Nachhaltigkeitsindikatorwerte zur Verfügung. Für produktentwicklungsferne Transformationssysteme können nach BECKER ET AL. für die Synthese bzw. Individualisierung der ökonomischen und gesellschaftlichen Nachhaltigkeitsindikatorwerte Strukturhebungen<sup>631</sup> unterschiedlicher Wirtschaftsbereiche nach STATISTISCHES BUNDESAMT verwendet werden.<sup>632</sup> Um die Modellhaftigkeit bzw. den Modellcharakter der Darstellung der Methodik zur Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte sicher zu stellen, wird auf die Individualisierung der Partialmodelle in diesem Kapitel verzichtet.<sup>633</sup>

### 4.3.1 Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte aus der Fabrikation

Prinzipiell unterscheiden sich die produktentwicklungsnahen im Vergleich zu den produktentwicklungsfernen Transformationssysteme durch die frühere Informationsverfügbarkeit auf der Ebene der Operanden. Unabhängig davon wird konsistent zu dem Vorgehen der Ökobilanz die Datenbasis zur Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte über die Materialflüsse innerhalb der Technosphäre synthetisiert. Analog zur Ökobilanz werden entsprechend Formel (14) Flüsse von Material und Energie über Charakterisierungsfaktoren zu Nachhaltigkeitsindikatorwerten individualisiert.

#### 4.3.1.1 Synthese der ökologischen Indikatorwerte aus der Fabrikation

Die Wahl des geeigneten Partialmodelles zur Synthese der ökologischen Wirkungsindikatorwerte hängt vom Stand der Produktentwicklung ab. Eine eingehende Analyse unterschiedlicher Bilanzierungsmethoden der Ökosphäre ist u. a. bei STAHL<sup>634</sup> und SCHENK ET AL.<sup>635</sup> zu finden. Nach Abschnitt 3.2.1 ist die Anwendung der Ökobilanz als produktentwicklungsbegleitendes Vorgehen nicht geeignet. Zur Synthese der Wirkungsindikatorwerte stehen der Produktentwicklung neben der Ökobilanz die vereinfachten ökologischen Bewertungsmethoden zur Verfügung. Der *Eco-indicator 99* ist durch die methodenseitigen Partialmodelle zur direkten Synthese der Wirkungsindikatoren ohne vorherige Synthese der Wirkungsindikatorwerte inkonsistent mit dem in Abschnitt 4 beschriebenen Vorgehen der Nachhaltigkeitsbilanzierung. Das Individualisieren der Indikatorwerte einzelner Transformationssysteme oder Materialflüsse basiert auf dem Vorgehen der Ökobilanz mit anschließender Bewertung und Gewichtung der Ergebnisse zur Aggregation zu einem Wert über sog. Eco-Indikatoren als Charakterisierungsfaktoren.<sup>636</sup> Die Aggregation unterschiedlicher Wirkungskategorien durch die Gewichtung und Normierung zu einem Wirkungsindikator ist bereits ein Teilschritt der Analyse und abhängig von dem festgelegten Ziel und dem Untersuchungsrahmen.

<sup>631</sup> Statistisches Bundesamt 2015h

<sup>632</sup> Becker et al. 2009, S. 18ff.

<sup>633</sup> Die Individualisierung der Partialmodelle ist von dem jeweiligen Problem und der zur Verfügung stehenden Datenbasis abhängig. Eine Individualisierung, wie sie in Abschnitt 5 stattfinden wird, ist nicht für jede Problemstellung anwendbar.

<sup>634</sup> Stahl 1998, S. 30ff.

<sup>635</sup> Schenk et al. 2014, S. 595 nach Frischknecht 2009, S. 88

<sup>636</sup> Goedkoop und Spriensma 2001, S. 2ff. nach Goedkoop 1995, S. 63ff.

Die Methodik *Kumulierter Energieaufwand* mit den hinterlegten Partialmodellen betrachtet Aspekte des Primärenergieverbrauches zur Analyse von Energieeinsparpotenzialen.<sup>637</sup> Eine ökologische Betrachtung auf Basis einer reinen energetischen Analyse wird dem Grundgedanken einer äquivalenten Berücksichtigung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit nicht gerecht. Sicherlich sind ökologische Einsparungen durch die Energieverbrauchsoptimierung möglich. Ökonomisch betrachtet sind bei den z. Z. geltenden Energiekostenanteilen unter 10 % (vgl. Abschnitt 3.2.2.1) durch Energieeinsparungen ökonomische Optimierungsmöglichkeiten nicht im selben Maße im Vergleich zu den ökologischen Potenzialen gegeben. Zudem sind von der ökonomischen Seite Materialeinsparungen bei Materialkostenanteilen über 60 % im ver- und bearbeitenden Gewerbe wirksamer.<sup>638</sup>

Für die frühen Teilprozesse der Produktentwicklung wird nach Abschnitt 2.1.3 der MIPS zur Synthese der Wirkungsindikatorwerte nach Formel (5) vorgeschlagen und für diese Arbeit als Methode einer durchgehenden und entwicklungsbegleitenden Synthese der ökologischen Nachhaltigkeitsindikatorwerte herangezogen. Eine durchgängige Synthese auf Basis einer Methode für unterschiedliche Konkretisierungsstufen des zu entwickelnden Produktes garantiert keine ökologische Richtungssicherheit aufgrund des Dilemmas der Produktentwicklung (vgl. Abschnitt 1). Es kann nicht gewährleistet werden, dass die Rangliste nach Wirkungsindikatorwerten zweier Konzepte nach der Konkretisierung zu zwei Entwürfen gleich bleibt. LANG-KOETZ ET AL. merken an, dass trotz der steigenden Konkretisierung das Einhalten von Anforderungen die Richtungssicherheit gewährleistet.<sup>639</sup> Die steigende Konkretisierung führt zu einer detaillierteren Antizipierbarkeit der Transformationssysteme. Die Einhaltung von Anforderungen gewährleistet jedoch keine Richtungssicherheit im Sinne eines möglichen höheren synthetisierten Wirkungsindikatorwertes durch das Detaillieren des Transformationssystemes von der Verfahrens- auf die Operatoren-Ebene beispielsweise.

---

<sup>637</sup> VDI 4600, S. 3

<sup>638</sup> Arthur D. Little GmbH et al. 2005, S. 22 beziehen diese Aussage auf die Beschäftigungszahlen.

<sup>639</sup> Lang-Koetz et al. 2006, S. 418ff.

Die den Transformationssystemen zugewiesenen Materialien, Energien oder Strecken werden über Formel (15) zu der Materialintensität als ökologische Nachhaltigkeitsindikatorwerte einzelner Konkretisierungsebenen individualisiert.<sup>640</sup>

$M_{i,j,ke}$	$MI_{j,k,ke} = \sum_{f=1}^n M_{i,j,ke} * MI_{i,k}(M_{i,j,ke})$ (15)	$MI_{j,k,ke}$
--------------	---------------------------------------------------------------------	---------------

mit	$M_{i,j,ke}$	Menge des an Material, Energie und der Strecke i eines Transformationssystemes j der Konkretisierungsebene ke	kg, J, m
	$MI_{j,k,ke}$	Material-Input wegen des Transformationssystemes j in Mlt-Kategorien k der Konkretisierungsebene ke	kg
	$MI_{i,k}$	Material-Intensität eines Materials, einer Energie oder einer Strecke i zur Mlt-Kategorie k	$\frac{kg}{kg}, \frac{kg}{J}, \frac{kg}{m}$

Die Material-Intensität entspricht dem Charakterisierungsfaktor nach Formel (14). Über die Summation der Transformationssysteme wird der gesamte Material-Input des zu entwickelnden Produktes auf der bestehenden Konkretisierungsebene individualisiert. Eine Normierung über die Serviceeinheit nach Formel (6) ist bei dem Vergleich von Varianten selber Konkretisierungsebene nicht erforderlich. Bei dem Vergleich unterschiedlicher Wirkprinzipien oder Entwürfe für Bauteile bzw. Baugruppen untereinander ist eine äquivalente Serviceeinheit bzw. prozessuale Einheit vorausgesetzt (vgl. Abschnitt 4.2). Die Menge und Art des Materiales, die für die jeweilige Variante des zu entwickelnden Produktes antizipiert wird, legt die prozessualen Einheiten des jeweiligen Transformationssystemes fest. Die Variation von Materialien zur Konkretisierung eines physikalischen Effektes beispielsweise hat eine Variation der prozessualen Einheit der Fabrikationsprozesse bei gleichbleibenden prozessualen Einheiten für den Einsatz zur Folge. Beispielsweise wird zur Bereitstellung der Energie zur Erzeugung eines Blitzlichtes ein Kondensator basierend auf dem physikalischen Effekt der Kapazität<sup>641</sup> verwendet. Die gleiche Kapazität als Funktion der relativen Permittivität des Dielektrikums und dem Verhältnis aus Plattenfläche und Plattenabstand kann über mehrere Variationen dieser Merkmale erreicht werden. Bei gleicher prozessualer Einheit für den Einsatz des zu entwickelnden Blitzes ändern sich durch Variation des Stoffes des Dielektrikums die prozessualen Einheiten der Fabrikationsprozesse zur Be- bzw. Verarbeitung des Kondensators bzw. seiner Werkstoffe.

Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes sind die Wirkungsindikatorwerte in Form der Mlt-Kategorien entsprechend der Konkretisierungsebene des zu entwickelnden Produk-

<sup>640</sup> Den Teilprozessen der Produktentwicklung ist keine eindeutige Zuweisung der Antizipierbarkeit von Transformationssystemen auf den Abstraktionsebenen Prozess ( $j \triangleq p$ ), Verfahren ( $j \triangleq v$ ) und Operand ( $j \triangleq o$ ) des Prozessmodelles möglich. Die Konkretisierungsebenen des zu entwickelnden Produktes können Wirkstrukturen, Konzepte, Entwürfe oder reale Bauteile sein.

<sup>641</sup> Koller und Kastrop 1994, S. 355

tes. Sie können je nach Zweck der Untersuchung zu einer Matrix eines Transformationssystems nach Formel (5) summiert oder zusätzlich weiter über sämtliche Transformationssysteme aggregiert werden.

#### 4.3.1.2 Synthese der ökonomischen Indikatorwerte aus der Fabrikation

Aufgrund des materialflussbasierten Vorgehens der Nachhaltigkeitsbilanzierung dienen die Materialflüsse als Grundlage der Synthese der ökonomischen Indikatorwerte der Fabrikationsprozesse. Je nach Informationsverfügbarkeit und Konkretisierung des zu entwickelnden Produktes werden Prozesse, Verfahren bzw. Operanden oder Operatoren betrachtet. Formeln (16) bis (19) stellen die Partialmodelle zur Verfügung.

$M_{i,ke}$	$Mk_{j,ke} = \sum_{i=1}^n M_{i,ke} * mk_{i,j}$	(16)	$Mk_{j,ke}$
	$Bk_{j,ke} = \sum_{i=1}^n M_{i,ke} * bk_{i,j}$	(17)	$Bk_{j,ke}$
	$Enk_{j,ke} = \sum_{i=1}^n M_{i,ke} * enk_{i,j}$	(18)	$Enk_{j,ke}$
	$Rk_{j,ke} = \sum_{i=1}^n M_{i,ke} * rk_{i,j}$	(19)	$Rk_{j,ke}$

mit

$M_{i,ke}$	Menge des Flusses an Material i der Konkretisierungsebene ke	kg
$Mk_{j,ke}$	Kosten des Flusses an Material des Transformationssystems j der Konkretisierungsebene ke	€
$mk_{i,j}$	Spezifische Kosten des Materials i eines Transformationssystems j	$\frac{€}{kg}$
$Bk_{j,ke}$	Beschäftigungskosten aus Transformationssystem j für die Konkretisierungsebene ke	€
$bk_{i,j}$	Spezifische Beschäftigungskosten zur Transformation des Materials i eines Transformationssystems j	$\frac{€}{kg}$
$Enk_{j,ke}$	Energiekosten aus Transformationssystem j der Konkretisierungsebene ke	€
$enk_{i,j}$	Spezifische Energiekosten zur Transformation des Materials i eines Transformationssystems j	$\frac{€}{kg}$
$Rk_{j,ke}$	Restliche Kosten aus Transformationssystem j der Konkretisierungsebene ke	€
$rk_{i,j}$	Spezifische restliche Kosten zur Transformation des Materials i <sup>642</sup> eines Transformationssystems j	$\frac{€}{kg}$

<sup>642</sup> Die restlichen Kosten berücksichtigen nach Fn. 526 u. a. auch fixe Kosten. Durch die Vorgabe des Partialmodells der Nachhaltigkeitsindikatorwerte nach Formel (14) wird der Charakterisierungsfaktor der restlichen Kosten variabel. Sie entsprechen den Zuschlagssätzen nach Abschnitt 3.2.2.1.1.

Sie dienen der Synthese der Indikatorwerte des monetären Einganges nach Formel (6) für die Ökonosphäre aus Sicht der Fabrikationsprozesse. Die Menge des Materials entspricht dem Produkt aus Dichte als intensive Eigenschaft und dem Volumen als Datenbasis zur Konkretisierung des jeweiligen physikalischen Effektes zum Wirkprinzip bzw. weiter zur Gestalt. Die spezifischen Kosten entsprechen den Charakterisierungsfaktoren nach Formel (14). Die auf die Transformationsmenge bezogenen spezifischen Kosten für Material, Beschäftigung, Energie und die restlichen Kosten werden entsprechend dem Partialmodell der Abstraktionsebene des Transformationssystems und den verfügbaren Informationen individualisiert.<sup>643</sup> Beispielsweise hängt die Synthese der ökonomischen Indikatorwerte auf Operatorebene von dem im jeweiligen Unternehmen verwendeten Kostenmodell ab und wird entsprechend nicht durch Zuhilfenahme von externen Informationen durchgeführt. Analog zu den ökologischen Nachhaltigkeitsindikatorwerten aus Abschnitt 4.3.1.1 erfolgt die Individualisierung der ökonomischen Nachhaltigkeitsindikatorwerte durch die Summation über die Materialien, Energien bzw. Strecken. Die umsatzseitige Individualisierung für das zu entwickelnde Produkt erfolgt konsistent zu Formel (16) über Formel (12).

Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes bilden die ökonomischen Indikatorwerte der Kostenseite als negative Nominalgüterflüsse und der Umsatzseite als positive Nominalgüterflüsse konsistent zur Lebenszykluskostenrechnung für die Partialmodelle der Ökonosphäre des produktentwicklungsnahen Unternehmens nach Abschnitt 3.2.2.1.1, der Ökonosphäre des Kunden von Investitionsgütern anhand der Bilanzierung von Operatoren nach Abschnitt 3.2.2.2 und der Ökonosphäre des Beschaffungsmarktes und der Beseitigungswirtschaft der Abschnitte 3.2.2.4 und 3.2.2.5.

#### **4.3.1.3 Synthese der gesellschaftlichen Indikatorwerte aus der Fabrikation**

Nach ARTHUR D. LITTLE GMBH liegt auf Grund der höheren öffentlichen Wirksamkeit von Entlassungen im Vergleich zu Kosteneinsparungen durch Materialeinsparungen

„die Aufmerksamkeit in Wirtschaft und Wirtschaftspolitik [...] traditionell bei der Senkung der Produktionskosten ganz überwiegend bei der Erhöhung der Arbeits- bzw. Personalproduktivität. Vielfach liegen aber die materialbedingten Vorleistungskosten [...] angesichts der heute arbeitsteiligen Produktionsweise höher als die Personalkosten der Betriebe [...].“<sup>644</sup>

Aufgrund dieses Zitates und des Forschungsstandes der Soziologie werden für diese Arbeit ausschließlich die Anzahl der Beschäftigten, die für die Durchführung von Fabrikationsprozessen innerhalb der gesamten Technosphäre benötigt werden, als Indi-

<sup>643</sup> Je nach betrachtetem Transformationsprozess können die spezifischen Kosten konsistent zu der Material-Intensität in Formel (15) auch auf eine Strecke für Transporte oder erzeugte Energiemengen bezogen werden. Sie werden aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht gesondert aufgeführt.

<sup>644</sup> Arthur D. Little GmbH et al. 2005, S. 22

katorwerte für die Nachhaltigkeit der Soziosphäre herangezogen (vgl. Abschnitte 2.2.1.3 und 3.2.3).<sup>645</sup> Die Synthese der Beschäftigungszahlen für die Transformationssysteme erfolgt konsistent zu dem Partialmodell nach Formel (13) entsprechend Formel (20) über den Materialfluss innerhalb der Technosphäre, der für die jeweilige Konkretisierungsebene des zu entwickelnden Produktes benötigt wird. Analog zu Fn. 643 und der Material-Intensität in Formel (15) können die Transporte und die Bereitstellung von Energie ebenfalls berücksichtigt werden.

$M_{i,ke}$	$B_{j,ke} = \sum_{i=1}^n M_{i,ke} * b_{i,j} \quad (20)$	$B_{j,ke}$
------------	---------------------------------------------------------	------------

mit	$B_{j,ke}$	Anzahl der Beschäftigten aus Transformationssystem j der Konkretisierungsebene ke	-
	$b_{i,j}$	Spezifische Beschäftigungskennzahl zur Transformation des Materials i eines Transformationssystemes j	$\frac{1}{\text{kg}}$

Die spezifische Beschäftigungskennzahl entspricht dem Kehrwert der Arbeitsproduktivität nach Abschnitt 3.2.3.

Als Nachhaltigkeitsindikator zur Indizierung der Versorgungsleistung wird die Gewährleistung der Grundbedürfnisbefriedigung (vgl. Abschnitte 2.2.1.3 und 3.2) durch die Beschäftigung nach Formel (21) herangezogen.

$M_{i,ke}$	$V_{j,ke} = \sum_{i=1}^n M_{i,ke} * v_{i,j} \quad (21)$	$V_{j,ke}$
------------	---------------------------------------------------------	------------

mit	$V_{j,ke}$	Gewährleistete Versorgung durch das Transformationssystem j der Konkretisierungsebene ke	Tag
	$v_{i,j}$	Spezifische Versorgungskennzahl eines Materials i eines Transformationssystemes j	$\frac{\text{Tag}}{\text{kg}}$

Die gewährleistete Versorgung entspricht beispielsweise den Tagen, an denen die durchschnittlichen Lebensunterhaltskosten eines durchschnittlichen Haushaltes von monatlich 2448 €<sup>646</sup> durch die „[...] eigene Arbeit“<sup>647</sup> (vgl. Abschnitt 2.2.1.3) gewährleistet ist.

Besonders bei der Synthese der Indikatorwerte zur gesellschaftlichen Sphäre zeigt sich der Einfluss der eingesetzten Technologie. Unterschiedliche Operatoren ermöglichen die Bearbeitung des Werkstückes mit den gleichen Verfahren zum selben Ergebnis. Beispielsweise wird der Drehprozess eines Werkstückes durch Verfahren wie

<sup>645</sup> Der Mehraufwand der Produktentwicklung für die Bilanzierung der Nachhaltigkeit und für die Entwicklung nachhaltigerer Produkte ruft bei konstanter Arbeitsproduktivität einen Zuwachs der Beschäftigungszahlen in der Produktentwicklung hervor. Ćorić et al. 2015, S. 1517ff. tragen diesem Sachverhalt Rechnung. Aus Gründen der Konsistenz mit der Ökobilanz und den vereinfachten ökologischen Bewertungsmethoden, die die Ökosphäre um die Wirkung der Individualisierung von Informationen über eine gewisse Zeit verkürzen, wird diesem Sachverhalt in dieser Arbeit nicht Rechnung getragen.

<sup>646</sup> Statistisches Bundesamt 2015d

<sup>647</sup> Blazejczak et al. 2000, S. 72; Brandl und Hildebrandt 2002, S. 27

Querrunddrehen, Längsrunddrehen und Querplandrehen<sup>648</sup> realisiert. Durch die technologischen Möglichkeiten der rechnergestützten numerischen Steuerung (*Computerized Numerical Control-CNC*) ist der Personaleinsatz v. a. in der Serienfertigung im Vergleich zu den mechanischen Operanden geringer. Der Anwendende einer Drehbank mit mechanischen Übertragungsgliedern führt den Werkzeugwechsel oder das Plandrehen zur Definition des Werkstück-Nullpunktes manuell durch.<sup>649</sup>

Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes bildet die Indikatorwerte der Soziosphäre aus Sicht der Fabrikationsprozesse ab. Die gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Fabrikationsprozessen bzw. das Sozialkapital sind von den Beschäftigungszahlen, die mit dem Lebenslauf des Produktes in Verbindung stehen, abhängig (vgl. Abschnitt 2.2.1.3). Die synthetisierten Beschäftigungszahlen dürfen ausschließlich als ein Indikator von vielen einer gesellschaftlichen Bilanzierung verwendet werden und erlauben z. Z. keine Analyse. Die Wirkung sich ändernder Beschäftigungszahlen auf die drei Ebenen des Sozialkapitales und der Versorgung sind nicht wissenschaftlich durchdrungen. Die gesellschaftlichen Folgen des Beispiels der Einführung von Pfand für Einwegverpackungen aus Abschnitt 3.2 auf die Fabrikationsprozesse zeigen die Schwierigkeiten auf. Es sind Stellen bei der kommunalen Beseitigungswirtschaft abgebaut worden, gleichzeitig ist die neue Branche mit den Produzenten von Rücknahmeautomaten mit neuen Arbeitsplätzen entstanden. Die Umverteilung der Beschäftigten auf unterschiedliche Wirtschaftszweige ist durch das vorgestellte Partialmodell synthetisierbar jedoch ihre Wirkung auf die Soziosphäre nicht analysierbar.

#### **4.3.2 Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte aus der Nutzung**

Entsprechend Abschnitt 3.1.4 ist eine Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte für die antizipierte Nutzung nicht uneingeschränkt möglich. Je nach Produktart kommen unterschiedliche Datenbasen und Partialmodelle zum Einsatz. Entsprechend ABELE ET AL. werden produktspezifische Modelle des Nutzungsprozesses benötigt (vgl. Abschnitt 3.1.4). Antizipiert werden Nutzungsprozesse bei Pkw über den Fahrzyklus nach Richtlinie 98/69 EG *über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen*, bei Waschmaschinen über DIN EN 60456, bei elektrischen Kochgeräten über DIN EN 60350 und bei Investitionsgütern über die Anforderungen des Nutzers oder nach VDMA 34160. Über die dort bereits antizipierten Nutzungsszenarien werden entsprechend Abschnitt 4.3.1 die ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeitsindikatorwerte aus Sicht des Nutzenden bzw. Kunden antizipiert. Je nach Produktart und Konkretisierungsgrad werden Transformationssysteme der Nutzung nach Bild 3-3 verkürzt, um weitere Transformationssysteme ergänzt und durch unterschiedliche Partialmodelle der ökologischen und ökonomischen Sphäre nach Abschnitt 3.2 konkretisiert. Beispielsweise entfallen bei der Entwicklung von

<sup>648</sup> DIN 8589 Blatt 1, S. 3ff.

<sup>649</sup> Neben der reinen Arbeitsproduktivität benötigt der Anwender der CNC-Maschine andere Qualifikationen (Humankapital) als der Anwender der konventionellen Maschine. Weiter hat die Technologie Einfluss auf die anderen Dimensionen der Nachhaltigkeit. Eine CNC-Maschine benötigt für die CNC-Steuerung mehr Energie als die konventionellen Maschine. Ebenfalls sind die Investitionskosten höher.

Komponenten oder Baugruppen eines Produktes die Inbetriebnahme oder der separate Kauf. Sie haben trotzdem einen Einfluss auf die Öko- und die Ökonosphäre des Kunden, beispielsweise durch ihr Eigengewicht oder die anfallenden Wartungsintervalle. Die Betrachtung der Soziosphäre ist nach Abschnitt 3.2.3 aufgrund des Standes des Wissens nicht möglich. Während der Nutzung von Konsumgütern ist ein möglicher Indikatorwert die Zeit, die nach der Nutzung des zu entwickelnden Produktes zur Interaktion mit gleichen Personen verfügbar bleibt. Nach der Annahme aus Abschnitt 2.2.1.3 ist das zu entwickelnde Produkt oder die Komponente aus Sicht des Nutzenden von Konsumgütern gesellschaftlich nachhaltiger, wenn es während des Einsatzes weniger personengebundene Leistungen in Anspruch als das Referenzprodukt nimmt und somit das bindende Sozialkapital unterstützt. Bei der Nutzung von Investitionsgütern haben sowohl die erforderliche Anzahl an Anwendenden als auch die brückenbildenden Interaktionsmöglichkeiten der Anwendenden untereinander nach Abschnitt 2.2.1.3 einen Einfluss auf die Soziosphäre aus Sicht der Einsatzprozesse.

#### 4.4 Analyse

Die Analyse findet entsprechend den festgelegten Zielen des Untersuchungsrahmens statt. Sie kann nach Abschnitt 4 auf Basis der Nachhaltigkeitsindikatorwerte oder der Nachhaltigkeitsindikatoren erfolgen. Die synthetisierten Nachhaltigkeitsindikatorwerte führen in den Sphären der Nachhaltigkeit zu einer Wirkung. Dazu werden die Nachhaltigkeitsindikatorwerte als Datenbasis konsistent zu der Ökobilanz durch Partialmodelle zu Nachhaltigkeitsindikatoren individualisiert.

Eine Individualisierung der Material-Intensitäten zu ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren ist durch den MIPS nicht vorgesehen. Die Wirkung der synthetisierten ökologischen Nachhaltigkeitsindikatorwerte auf die Ökosphäre erfolgt anhand von Vergleichen<sup>650</sup> unterschiedlicher Produktlebensläufe mit der gleichen prozessualen Einheit. Dabei ist der Produktlebenslauf mit der geringsten Material-Intensität zu bevorzugen.

Durch die Informationsverfügbarkeit und den Stand der Produktentwicklung ist eine Individualisierung der ökonomischen Nachhaltigkeitsindikatoren als Analysegrundlage nicht für jede Anspruchsgruppe möglich. Die Partialmodelle der Ökonosphäre der Anspruchsgruppen entsprechen den jeweiligen Modellen des Rechnungswesens der betrachteten Unternehmen.<sup>651</sup> Wie bereits in Abschnitt 2.2.1.2 beschrieben, trägt das zu entwickelnde Produkt über eine positive Nominalgüterbilanz zu einem ökonomisch nachhaltigen Zustand der Ökonosphäre des produktentwicklungsnahen Unternehmens bei, gewährleistet diesen jedoch nicht. Die Liquidität als Indikator eines ökonomisch nachhaltigen Unternehmens (vgl. Abschnitt 2.2.1.2) hängt nicht ausschließlich von den dem zu entwickelnden Produkt zuordenbaren Nominalgüterflüssen ab. Zur Analyse des ökonomischen Zustandes des produktentwicklungsnahen Unternehmens

<sup>650</sup> Schmidt-Bleek et al. 1998, S. 67ff.

<sup>651</sup> Die Partialmodelle des Rechnungswesens für die fabrizierenden Unternehmen können beispielsweise über die Standardkontenrahmen nach Datenverarbeitungsorganisation der Steuerbevollmächtigten für die Angehörigen des steuerberatenden Berufes in der Bundesrepublik Deutschland (DATEV) spezialisiert werden.

müssen sämtliche Geschäftsvorfälle berücksichtigt werden. Die Analyse des ökonomischen Zustandes der produktentwicklungsfernen Unternehmen und des Kunden ist im Sinne des Rechnungswesens nicht möglich, da die Informationen der Geschäftsvorfälle nicht zur Verfügung stehen. Hier wird davon ausgegangen, dass bei Unternehmen des Beschaffungsmarktes die erzeugten Umsätze nach Formel (12) durch die leistungswirtschaftlichen Prozesse der produktentwicklungsnahen Leistungswirtschaften bzw. Transformationssysteme zu einem ökonomisch nachhaltigen Zustand beitragen. Für Kunden von Investitionsgütern und Konsumgütern ist der Sachverhalt ähnlich. Bei Investitionsgütern trägt das zu entwickelnde Produkt zum ökonomisch nachhaltigen Zustand bei, wenn es über den gesamten Nutzungsprozess<sup>652</sup> einen möglichst geringen negativen Nominalgüterfluss hervorruft. Unter der Annahme, dass das Investitionsgut die Anforderungen des Kunden erfüllt, wird das Erreichen des ökonomisch nachhaltigen Zustandes über den geringst möglichen hervorgerufenen negativen Nominalgüterfluss während der Nutzung unterstützt. Dieser Sachverhalt gilt analog für die Nutzungsprozesse von Konsumgütern.

Eine Analyse der gesellschaftlichen Sphären auf Grundlage individualisierter Nachhaltigkeitsindikatoren ist z. Z. aufgrund des fehlenden Verständnisses der Soziosphäre nicht möglich. Zwar lassen die empirischen Ergebnisse von THENEN ET AL. (vgl. Abschnitt 3.2.3) den Schluss zu, dass Beschäftigung gesellschaftlich nachhaltig ist. Jedoch zeigen zum einen gesellschaftspolitische Diskussionen der vergangenen Jahre, dass Arbeit nicht uneingeschränkt als gesellschaftlich nachhaltig bzw. sozial anzusehen ist.<sup>653</sup> Zum anderen steht die Beschäftigung als brückenbildende Ebene des Sozialkapitales in negativer Wechselwirkung mit dem bindenden Sozialkapital (vgl. Abschnitt 3.2.3). Nach Abschnitt 3.2.3 bedingt das bindende Sozialkapital das Brückenbildende, gleichzeitig verhindert das Schaffen des brückenbildenden Sozialkapitals die Steigerung des bindenden Sozialkapitals.<sup>654</sup> Zudem ist die in dieser Arbeit zugrunde gelegte Annahme eines mit der Nutzungszeit von Konsumgütern abnehmenden Sozialkapitals sozialwissenschaftlich z. Z. nicht verifizierbar. Die gesellschaftlichen Nachhaltigkeitsindikatorwerte in Form der benötigten personengebundenen Leistung können nach Abschnitt 3.2.3 synthetisiert werden. Die Analyse hin zu einer positiven oder negativen Wirkung zweier Produktlebensläufe mit der selben prozessualen Einheit für den Einsatz und unterschiedlichen synthetisierten personengebundenen Leistungen in Form von Beschäftigungszahlen oder Einsatzzeiten ist nicht möglich.<sup>655</sup>

<sup>652</sup> Zwar widerspricht die Lebenszyklusbetrachtung nach Abschnitt 2.2.1.2 den Methoden des Rechnungswesens. Jedoch wird die zeitliche Verkürzung des zu betrachteten Zeitraums der Nachhaltigkeitsbilanzierung durch die Ökobilanz auf den gesamten Produktlebenslauf und nicht den während eines Bilanzierungszeitraums stattfindenden Teilprozessen der Nutzung vorgeschrieben.

<sup>653</sup> Fraktionsunabhängig ist in den letzten Jahren die Aussage „Sozial ist, was Arbeit schafft“ aufgetaucht und kontrovers diskutiert worden. Diese Aussage ist daraufhin durch „Sozial ist, was Arbeit schafft, von der man anständig leben kann“, „Sozial gerecht ist, was Arbeit schafft“ oder „Sozial ist, was gute Arbeit schafft“ relativiert worden.

<sup>654</sup> Wer einem Beruf nachgeht, kann weniger Zeit mit seiner Familie verbringen.

<sup>655</sup> Für den Fall, dass sich die Fabrikationsprozesse des Referenz-Produktes und des zu entwickelnden Produktes ausschließlich in der Menge der Materialien und Energien unterscheiden, die Transformationssysteme und Mate-

Somit ergibt sich durch den Stand des Wissens bedingt eine Aussage der Wirkung des zu entwickelnden Produktes auf die drei Sphären der Nachhaltigkeit auf Basis der in Bild 3-1 bzw. Bild 3-4 und durch Formeln (15) bis (21) individualisierbaren Nachhaltigkeitsindikatorwerte.

In Bild A-1 ist die hier beschriebene Methodikbeschreibung als Genom nach ZIER modelliert.<sup>656</sup>

## 4.5 Operationalisierung

Durch die Operationalisierung wird der Produktentwicklung nach Abschnitt 2.3 eine *tatsächliche Unterstützung* in Form einer EDV-Lösung bereit gestellt. Um dem Dilemma der Produktentwicklung und der variierenden Informationsverfügbarkeit gerecht zu werden, werden Transformationssysteme über die Abstraktionsebenen des Prozessmodelles nach Abschnitt 2.1.1 unterschiedlich individualisiert (vgl. Bild 4-1).

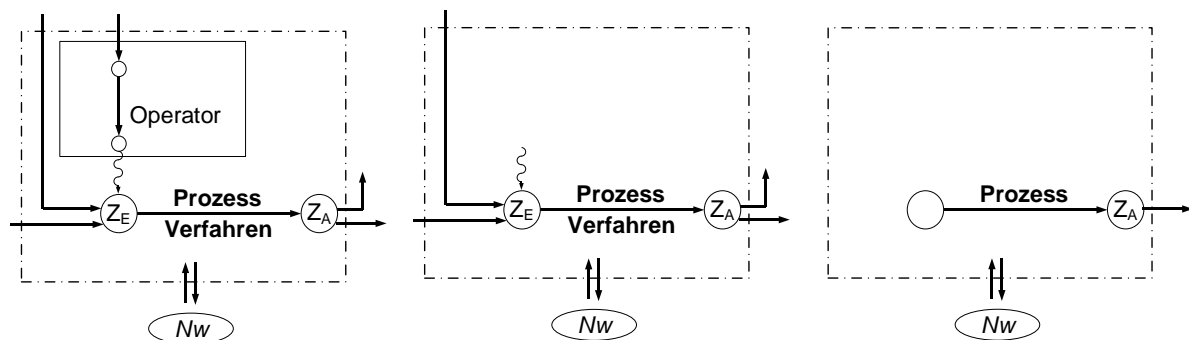


Bild 4-1: Die Abstraktionsebenen des Prozessmodelles

Auf der niedrigsten Abstraktionsebene werden Transformationssysteme über die Operatoren individualisiert. Es sind sämtliche eingehende bzw. ausgehende operatoren-spezifische Material- und Energieflüsse und insbesondere die Transformationszeit des Operanden bekannt. Über sämtliche Charakterisierungsfaktoren nach Formeln (15) bis (21) ist im Vergleich zu den anderen beiden Abstraktionsebenen des Prozessmodelles eine detailliertere bzw. genauere Individualisierung der Nachhaltigkeitsindikatorwerte möglich. Die Charakterisierungsfaktoren sind nicht für einen Operator festgelegt bzw. operatorspezifisch. Sie sind zum einen von der Zustandsänderung der zu transformierenden Materialien abhängig (vgl. Abschnitt 3.2.2.1.1). Zum anderen sind beispielsweise die restlichen Kosten von den Gemeinkostenzuschlagssätzen bzw. Maschinenstundensätzen abhängig, die willkürlich, unternehmens- und standortspezifisch sind (vgl. Abschnitt 3.2.2.1.1). Ein Operator ist beispielsweise ein bestimmtes Modell einer Servopresse eines bestimmten Herstellers. Eine Modellierung auf Ope-

rial- bzw. Energiearten äquivalent sind, ist der Produktlebenslauf mit der höheren Beschäftigung bezüglich der monetären Grundbedürfnisbefriedigung und des brückenbildenden Sozialkapitales gesellschaftlich nachhaltiger. Dies ist in dem Beispiel in Kapitel 5.4 der Fall.

<sup>656</sup> Zier 2014. S. 77ff.

ratorenebene ist wegen der Informationsverfügbarkeit i. d. R. nur für die in den produktentwicklungsnahen Transformationssystemen zum Einsatz kommenden Operatoren möglich.

Falls der zum Einsatz kommende Operator nicht antizipierbar ist, werden Transformationssysteme über Verfahren individualisiert. Zum Antizipieren von Verfahren werden sämtliche Operatoren aggregiert, die zur Realisierung eines Prozesses die verfahrensspezifischen Merkmale besitzen (vgl. Abschnitt 2.1.1) und einen Eingangszustand in einen antizipierten Ausgangszustand transformieren können. Es sind verfahrenstypische Materialflüsse wie auch Charakterisierungsfaktoren bekannt. Die Charakterisierungsfaktoren sind als arithmetische Mittel sämtlicher Operatoren, die die verfahrensspezifische Merkmale aufweisen, um einen Eingangszustand in einen antizipierten Ausgangszustand zu transformieren, zu verstehen. Somit sind unternehmens- oder standortspezifische Charakterisierungsfaktoren nicht individualisierbar. Verfahren aggregieren beispielsweise Servopressen sämtlicher Hersteller, die die Transformation eines bestimmten Eingangszustandes in einen bestimmten Ausgangszustand realisieren können. Eine Modellierung auf Verfahrensebene ist i. d. R. für die produktentwicklungsfernen Teilprozesse des Produktlebenslaufes möglich.

Ist ausschließlich das benötigte Material oder die benötigte Energie am Ausgang eines Transformationssystemes bekannt, werden Transformationssysteme über Prozesse modelliert. Die Modellierung von Prozessen kommt dann zum Einsatz, wenn entweder der Anfangszustand des zu transformierenden Materials oder der zu transformierenden Energie nicht bekannt ist oder aufgrund des definierten Untersuchungsrahmens der Eingang abgeschnitten wird. Somit ist eine Individualisierung der Nachhaltigkeitsindikatorwerte ausschließlich durch den vorhandenen Ausgangszustand des Operanden möglich. Entgegen dem funktionalen Systemkonzept nach ROPOHL<sup>657</sup> oder dem Prozessmodell nach HEIDEMANN (vgl. Abschnitt 2.1.1) sind für das Transformationssystem auf der Abstraktionsebene von Prozessen i. d. R. keine Inputs oder Eingangsgrößen antizipierbar.

Jedes Transformationssystem wird durch die Charakterisierungsfaktoren – sie beziehen sich unabhängig von der betrachteten Dimension der Nachhaltigkeit konsistent zu der Ökobilanz auf die Mengeneinheit 1 – modelliert (vgl. Kapitel 4.3). Entsprechend den festgelegten Zielen und dem Untersuchungsrahmen werden Transformationssysteme, operationalisiert durch die Charakterisierungsfaktoren, über Material- und Energieflüsse verknüpft. Ausgehend von dem produktentwicklungsnahen Transformationssystem und der definierten prozessualen Einheit als globale Variable (gV)<sup>658</sup> werden entsprechend dem Untersuchungsrahmen die Transformationssysteme individuali-

---

<sup>657</sup> Ropohl (2009), S. 75ff.

<sup>658</sup> Die globale Variable steht sämtlichen Transformationssystemen zur Verfügung und individualisiert die auf die Mengeneinheit 1 modellierten Transformationssysteme zur Erfüllung der prozessualen Einheit. Sie entspricht beispielsweise einer zu bearbeitenden Menge an Material am Eingang oder am Ausgang eines Transformationssystems aus Formeln (15) bis (21).

siert. Von der definierten prozessualen Einheit hängen sämtliche Material- und Energieflüsse der mit dem Lebenslauf des zu entwickelnden Produktes über Material- oder Energieflüsse in Verbindung stehenden Transformationssysteme ab. Über die definierte prozessuale Einheit, quantifiziert über die globale Variable, werden die auf die Mengeneinheit 1 normierten Transformationssysteme skaliert.

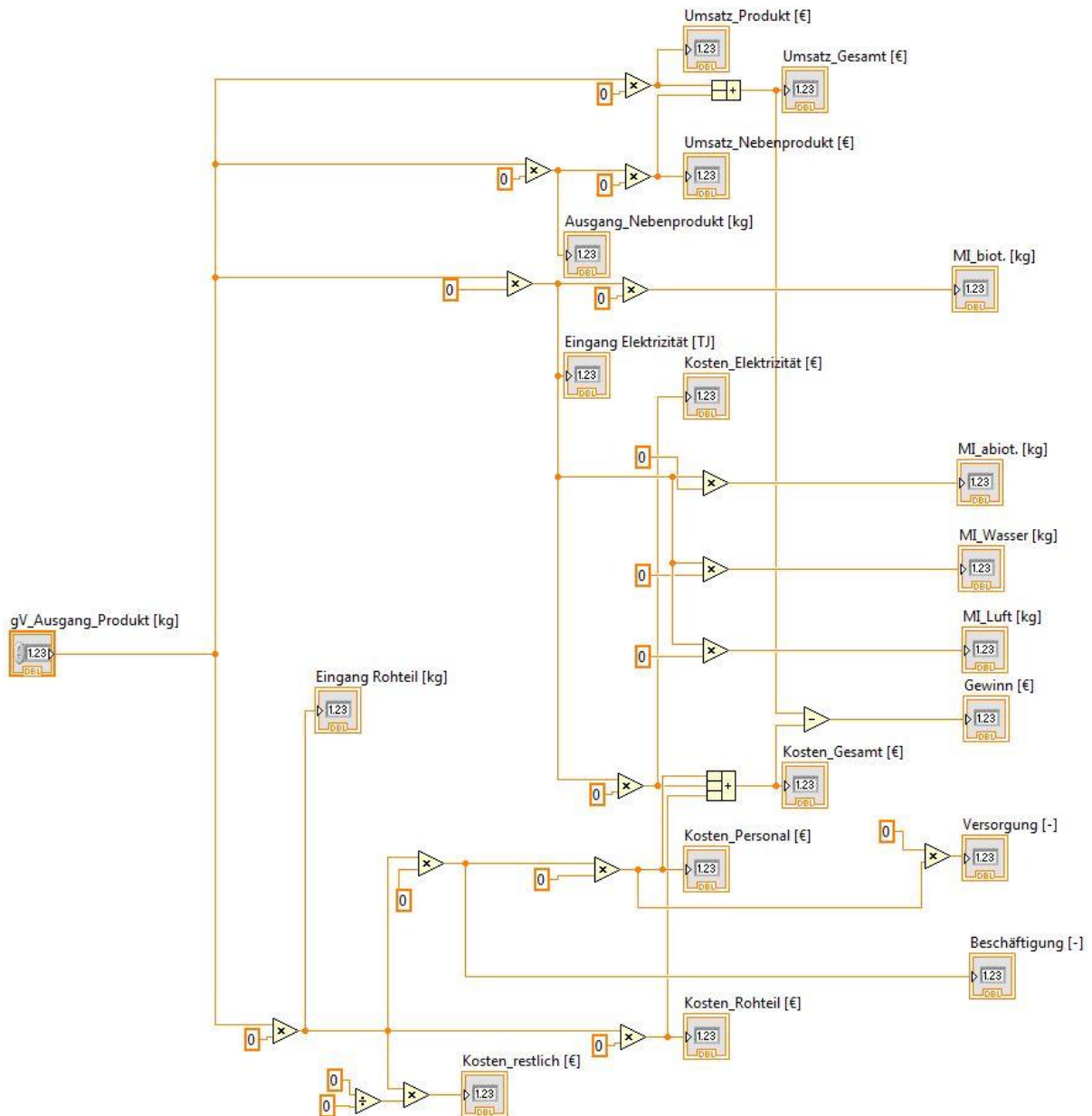
Bild 4-2 verdeutlicht beispielhaft die Umsetzung einer Modellierung eines Transformationssystemes in *Microsoft Excel*.

		<b>Fluss</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Fluss</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>
Prozess	<b>Ausgang</b>	<b>Produkt</b>	gV	kg			
		Nebenprodukt		kg			
Verfahren	<b>Eingang</b>	Rohteil		kg			
		Elektrizität		J			
Operand	<b>spez. Menge Ausgang</b>	<b>Produkt</b>	1	kg/kg			
		Nebenprodukt		kg/kg			
	<b>spez. Mengen Eingang</b>	Rohteil		kg/kg			
		Hilfsstoff		kg/kg			
		Elektrizität		J/kg			
	<b>ökol. Charak.</b>	Rohteil			Elektrizität		
		abiot.		kg/kg	abiot.		kg/J
		biot.		kg/kg	biot.		kg/J
		Wasser		kg/kg	Wasser		kg/J
		Luft		kg/kg	Luft		kg/J
	<b>ökon. Charak. Ausgang</b>	<b>Produkt</b>		€/kg			
		Nebenprodukt		€/kg			
	<b>ökon. Charak. Eingang</b>	Rohteil		€/kg			
		Hilfsstoff		€/kg			
		Elektrizität		€/J			
	<b>gesell. Charak.</b>	Produktivität		1/kg			
		Versorgung		1/kg			
	<b>Kostenstruktur</b>	Material		%			
		Rest		%			

**Bild 4-2: Beispielhafte Spezialisierung eines Transformationssystemes in Excel**

Das Ergebnis des Antizipierens dieses Transformationssystemes hat Flüsse von Produkten und Nebenprodukten am Ausgang und Rohteilen und Elektrizität am Eingang ergeben. Abhängig von der dem Ziel der Nachhaltigkeitsbilanzierung entsprechenden Menge des Produktes als prozessuale Einheit, die in dem Beispiel der globalen Variablen entspricht, ändert sich die benötigte Menge an Elektrizität und Rohteilen am Eingang wie auch die Menge an Produkten und Nebenprodukten am Ausgang. Sämtliche Flüsse am Eingang und am Ausgang sind über ein Kilogramm Produkt am Ausgang spezifiziert. Von diesen Flüssen sind die zu individualisierenden Nachhaltigkeitsindikatorwerte über die Charakterisierungsfaktoren abhängig. Die Charakterisierungsfaktoren entsprechen den Charakterisierungsfaktoren der jeweiligen Nachhaltigkeits-sphäre aus Formel (15) bis (21). Dieses Partialmodell wird je nach antizipierten Transformationssystem durch die Flüsse an Materialien und Energien und ihren Charakterisierungsfaktoren individualisiert.

Zur Überprüfung der Operationalisierbarkeit der Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte ist neben *Excel* auch *National Instruments LabVIEW* eingesetzt worden. Während bei *Microsoft Excel* jedes antizipierte Transformationssystem einem Tabellenblatt entspricht, werden in *LabVIEW* Transformationssysteme durch sog. *Virtuelle Instrumente (VI)* als Boxen modelliert (vgl. Bild 4-3).



**Bild 4-3: Beispielhafte Spezialisierung eines Transformationssystems in *LabVIEW***

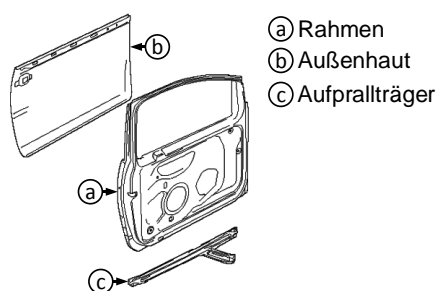
Die so erstellten Tabellenblätter bzw. VI können in einer Bibliothek gespeichert und wiederverwendet werden, was der Hauptintension einer Operationalisierung entspricht. Beispielsweise sind für die in Kapitel 5 beispielhaft angewendete Operationalisierung der Nachhaltigkeitsbilanzierungsmethode elf Transformationssysteme antizipiert worden. Dabei sind für die Bilanzierung der Referenz und der alternativen Transformationssysteme, bis auf zwei Anpassungen bezüglich der spezifischen Mengen, identische Tabellenblätter bzw. VI verwendet worden.

## 5 Die Nachhaltigkeitsbilanzierung am Beispiel der alternativen Verwendung von Neuschrott

In diesem Kapitel werden die in den vorangegangenen Kapitel dargelegten theoretischen Grundlagen in Form der *beabsichtigten Unterstützung* auf ein fiktives Beispiel der Nachhaltigkeitsbilanzierung der Verwertung von Verschnitt als Referenz und der alternativen Verwendung des Verschnittes aus einer Rahmenfertigung für Fahrzeugtüren angewendet. Dieses entspricht der Vermeidung von Produktionsrückläufen nach VDI 2243 BLATT 1.<sup>659</sup> Analog zu dem Verständnis der *Anwendungsvaluierung* steht nicht die Analyse der Nachhaltigkeit einer alternativen Verwendung von Neuschrott aus der Rahmenfertigung im Vordergrund. Im Fokus steht die Durchführung der in Kapitel 4 beschriebenen Methodik als Grundlage für die in den Abschnitten 6.1 und 6.2 durchgeführte Evaluierung.

### 5.1 Ausgangssituation der Produktentwicklung

Die Produktentwicklung steht vor der Aufgabe eine Fahrzeugtür eines Pkw zu entwickeln. Dabei sind im Vergleich zu den in Abschnitten 2.1.3 und 4.2 diskutierten entwicklungsmethodischen Randbedingungen Abweichungen vorhanden. Aufgrund der vorhandenen Pressenstraßen steht die Eigenfertigung bereits zu Beginn der Produktentwicklung fest.<sup>660</sup> Zudem wird die Grobgeometrie des Konzeptes der Fahrzeugtür durch das Designteam in Form eines Claymodelles bzw. von Class-A-Modellen des Exterieurs vorgegeben.<sup>661</sup> Das Design schreibt eine Tür mit Türrahmen vor. Bild 5-1 zeigt den Aufbau einer Fahrzeugtür mit den für den Seitenaufprallschutz relevanten Bauteilen.



**Bild 5-1: Aufbau der für den Seitenaufprallschutz relevanten Bauteile einer Fahrzeugtür<sup>662</sup>**

<sup>659</sup> VDI 3323 Blatt 1, S. 10; Allwood et al. 2014, S. 207 nutzen als Metapher zur Beschreibung der Umleitung von Schrotten aus der Fertigung zur Vermeidung des Einschmelzens durch ein Verwenden die Elster; die englische Firma Abbey Steel & Shearing Company Limited vertriebt unter dem Namen Abeesteel™ aus Schrott zugeschnittene Platinen für eine nicht antizipierte Fertigung; Schmitt und Leitner 1995, S. 129ff. zeigen auf, wie Altschrott aus Fahrzeugkarosserien nach dem Einsatz nicht antizipiert sondern zufällig verwendet werden kann.

<sup>660</sup> Die Entscheidung der Eigenfertigung oder des Fremdbezuges ist immer möglich zu treffen. Aufgrund des hohen Investitionsaufwandes für Pressenstraßen wird davon ausgegangen, dass bei Karosserieteilen, wenn entsprechende Betriebsmittel vorhanden sind, eine Eigenfertigung einer Forderung entspricht.

<sup>661</sup> Landrock 2009, S. 17f.; Kraus 2007, S. 38ff.

<sup>662</sup> Vereinfachte Darstellung nach VW Parts America 2015; für die weiteren Ausführungen wird als Referenzprodukt die vordere Tür eines VW Golfes der Baujahre 2003-2008 herangezogen. Nach Hamm 2015 wiegt der Rahmen a mit der Originalteilenummer 1K3831301AB 9,14 kg, die Außenhaut b mit der Originalteilenummer 1K3831105J 5,21 kg und der Aufprallträger c mit der Originalteilenummer 1K3831505C 2,99 kg. Das Gesamtgewicht der strukturelevanten Bauteile der Tür des Golfes entspricht annähernd der Tür des Fahrzeuges H nach Hilfrich et al. 2007,

Der Fahrzeugtürrahmen stellt ein Bauteil der Baugruppe Fahrzeugtür dar und dient als Verbindungsbauteil zur Anbindung von Karosseriekomponenten, Innenverkleidungen oder Motoren und Lautsprechern. Über Beschläge wird die Baugruppe an die Karosserie montiert. Neben der Integration unterschiedlicher Funktionsträger ist die Tür eine wichtige Baugruppe des aktiven und passiven Sicherheitskonzeptes.<sup>663</sup> Der Schutz der Insassen vor der Umgebung als aktive Sicherheitsfunktionen der Tür wird beispielsweise über den physikalischen Effekt *Oberflächenspannung*<sup>664</sup> realisiert, die passive Sicherheitsfunktion über eine *irreversible plastische Verformung*<sup>665</sup> der strukturelevanten Türbauteile aus Bild 5-1. Aus ökologischer Sicht ist hauptsächlich das Gewicht der Tür während der Nutzung ausschlaggebend.<sup>666</sup> Da der Türrahmen tangential zur Strömungsrichtung liegt, sind Formwiderstände zu vernachlässigen. In Anlehnung an Abschnitt 2.1 werden diese klassischen funktionalen Anforderungen an den Fahrzeugtürrahmen als erfüllt vorausgesetzt. Neben diesen funktionalen Anforderungen hat ein Benchmark für Fahrzeugtüren ergeben, dass die Kosten für die strukturelevanten Bauteile<sup>667</sup> nach Bild 5-1 durchschnittlich 45€ pro Tür<sup>668</sup> bei einem Durchschnittsgewicht von 16 kg<sup>669</sup> betragen. Die eigene Tür des Vorgängermodelles ohne Anbauten wiegt 17 kg.<sup>670</sup> Die geschätzten Produktstandardkosten (vgl. Bild 3-6) belaufen sich auf 46€.<sup>671</sup> Die Produktstandardkosten beinhalten Materialkosten von 23€, Fertigungskosten von 13€, Montagekosten von 4€ und Abschreibungen von 6€.<sup>672</sup> Als Zielkosten werden für die neue Tür 42€ für die strukturelevanten Bauteile durch die Kalkulationsabteilung vorgegeben.<sup>673</sup> Die Produktentwicklung hat die Aufgabe, die Zielkosten einzuhalten. Zusätzlich sollen für die Marketingabteilung<sup>674</sup> Nachhaltigkeitsindikatorwerte des Konzeptes der neuen Tür ermittelt werden.

Zum Erreichen der Zielkosten bestehen unterschiedlichste Strategien. Eine Strategie der Kostenreduzierung besteht in Kosteneinsparungen bei den Materialien als höchstem Kostenanteil durch eine Steigerung der Materialeffizienz. Maßnahmen der Materialeffizienz sind beispielsweise Änderungen des Türkonzeptes von den jetzigen

---

S. 524ff., realisiert durch das Türkonzept *Schließblech* mit einem Gesamtgewicht von abgelesenen 17,5 kg. Diese Tür wird als Referenz für die weitere Betrachtung verwendet. Für das Konzept des neuen Türrahmens nach dem Class-A-Modell wird angenommen, dass er das selbe abgeschätzte Gewicht wie das reale Gewicht des Türrahmes des Vorgängermodelles haben wird.

<sup>663</sup> Birkert et al. 2013, S. 35; Birkert et al. 2013, S. 42; Kramer 1998, S. 160; Grabner und Nothhaft 2006, S. 162; Grabner und Nothhaft 2006, S. 178ff.

<sup>664</sup> Koller und Kastrup 1994, S. 242

<sup>665</sup> Koller und Kastrup 1994, S. 122

<sup>666</sup> Birkert et al. 2013, S. 9; Birkert et al. 2013, S. 42

<sup>667</sup> Bei dem Benchmark nach Hilfrich et al. 2007, S. 522ff. haben die Strukturmerkmale der Türen im Vordergrund gestanden. Dem entsprechend sind ausschließlich strukturelevante Bauteile in diese beispielhafte Untersuchung eingeflossen.

<sup>668</sup> Hilfrich et al. 2007, S. 528

<sup>669</sup> Hilfrich et al. 2007, S. 526

<sup>670</sup> Hilfrich et al. 2007, S. 526

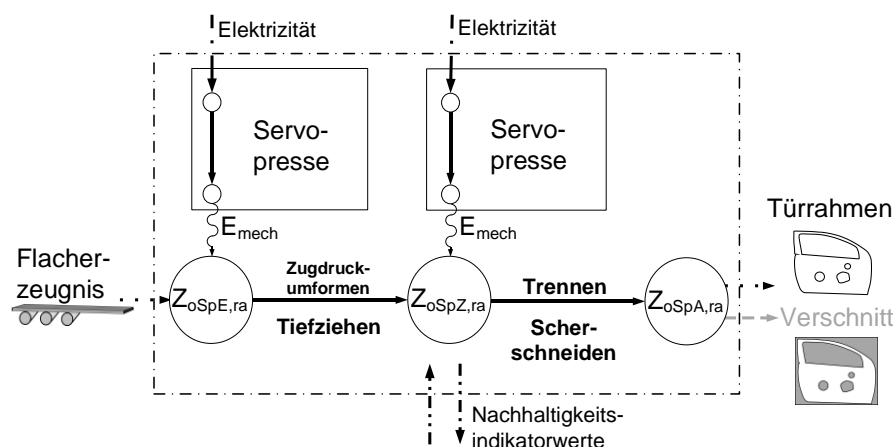
<sup>671</sup> Hilfrich et al. 2007, S. 528

<sup>672</sup> Hilfrich et al. 2007, S. 528

<sup>673</sup> Kostengünstigste Türvarianten G, J und K nach Hilfrich et al. 2007, S. 528

<sup>674</sup> Nach Kleinschmidt et al. 1996, S. 52f. ist neben der Entwicklung des Produktes und der dazugehörigen Kosten- und Marktanalyse das Planen des Marketings eine Aufgabe der Produktentwicklung.

Schließblechen auf Türkonzepte mit vollgepressten Bauteilen, Mehrteilrahmenkonzepte, Stechrahmenkonzepte oder Tailored Blank-Konzepte<sup>675</sup>. Weitere mögliche Maßnahmen sind die Variation des Materials hin zu günstigeren Flacherzeugnissen oder einer Materialreduzierung durch Stärkenänderungen der Bleche. Aufgrund langfristiger Lieferverträge<sup>676</sup> für die Flacherzeugnisse der Karosseriebauteile werden der Produktentwicklung die möglichen Materialien für die Tür durch die Materialwirtschaft vorgegeben.<sup>677</sup> Eine alternative Maßnahme der Kosteneinsparung ist die Optimierung der Materialeffizienz der eigenen Fertigungsprozesse. Bild 5-2 beschreibt beispielhaft das Transformationssystem zur Fertigung des realen Bauteiles a (ra).



**Bild 5-2: Der Fertigungsprozess eines Fahrzeugtürrahmens (Bauteil a)**

Zur Fertigung des realen Bauteiles a kommen zwei Prozesse aufgeteilt auf sechs Pressen<sup>678</sup> zum Einsatz. I. d. R. finden zugdruckumformende und trennende Prozesse in der gleichen Pressenstraße<sup>679</sup> bestehend aus mehreren Servopressen als Operatoren (oSp) stufenweise über Zwischenzustände statt.<sup>680</sup> Zunächst wird das Flacherzeugnis aus Tiefziehstahlwerkstoffen in Form von Platinen durch das Tiefziehen mit Werkzeugen<sup>681</sup> umgeformt. Überflüssiges Material an den Rändern oder Ausschnitte für Glasfenster, für die Mechanik der Fensterheber, der Außenspiegel und der Türschlösser wird durch trennende Prozesse durch das Scherschneiden<sup>682</sup> realisiert. Zur Reduzierung der nötigen Umformkräfte und des Werkzeugverschleißes werden entweder die vorhandene Korrosionsschutzschicht des Flacherzeugnisses oder zusätzliche Schmierstoffe verwendet.<sup>683</sup> Ergebnis der Fertigung ist der Fahrzeugtürrahmen und der Verschnitt als Neuschrott. Bei diesem Transformationssystem, bestehend aus

<sup>675</sup> Hilfrich et al. 2007, S. 525

<sup>676</sup> Göpfert und Grünert 2012, S. 167f.; langfristige Lieferverträge sichern dem Erstausrüster eine marktpreisunabhängige Beschaffung.

<sup>677</sup> Aus Sicht der Produktentwicklung sind die Materialeigenschaften eine unabhängige Eigenschaft. Die langfristigen Lieferverträge führen zu einem unumgänglichen Antizipieren der verfügbaren Materialien durch die Produktentwicklung.

<sup>678</sup> Birkert et al. 2013, S. 451f.

<sup>679</sup> Erstausrüster setzen zur Fertigung von umgeformten Blechen nach Birkert et al. 2013, S. 457 i. d. R. Servopressen ein.

<sup>680</sup> Birkert et al. 2013, S. 43ff.;

<sup>681</sup> DIN 8584 Blatt 3, S. 3ff.

<sup>682</sup> DIN 8588, S. 3

<sup>683</sup> Birkert et al. 2013, S. 30; hier wird keine zusätzliche Verwendung von Schmiermitteln während der Fertigung angenommen.

den Servopressen als Operatoren, beträgt der Materialnutzungsgrad<sup>684</sup> 45,6%.<sup>685</sup> Ähnlich laufen die Transformationssysteme zur Bearbeitung der Außenhaut und der Aufprallträger ab.<sup>686</sup> Der Materialausnutzungsgrad der Außenhaut beträgt 80 %<sup>687</sup> und der des Aufprallträgers 60 %<sup>688</sup>.

Eine ökonomische Analyse (siehe Abschnitt A.3.1) des produktentwicklungsnahen Bearbeitungsprozesses hat eine negative Wertschöpfung von ca. 30 % ergeben. Den größten Anteil an der negativen Wertschöpfung mit 77 % hat die Rahmenfertigung (vgl. Abschnitt A.3.1). Da „[...] alleine der Fensterausschnitt bei einer Tür mit Rahmen verhältnismäßig viel Abfall bedingt, welcher durch den Planer nicht mehr beeinflusst werden kann“,<sup>689</sup> sind alternative Verwendungsverfahren des Fensterausschnittes zur Steigerung des Materialnutzungsgrades nötig.<sup>690</sup> Der Verschnitt unterscheidet sich stofflich nicht von dem ursprünglichen Flacherzeugnis zur Rahmenfertigung. Seine chemische Zusammensetzung entspricht der des Flacherzeugnisses. Er wird aufgrund der Reinheit und der bekannten stofflichen Eigenschaften als Kühleisenschrott in der Hochofenroute oder als Ausgangsmaterial der Elektrostahlroute in der Stahlherstellung verarbeitet (vgl. Abschnitt 3.1.2).<sup>691</sup> Abhängig von dem Umformgrad im Bereich der Ausschnitte werden die mechanischen und fertigungstechnischen Eigenschaften, als von der fertigungstechnischen Vorgeschichte abhängige Eigenschaften des Verschnittes, im Vergleich zu denen des Flacherzeugnisses transformiert. Der Fensterausschnitt erfüllt die Anforderungen nach DIN EN ISO 10275 an den Verfestigungsexponenten.<sup>692</sup> I. d. R. steigt aufgrund der Kaltverfestigung die Dehngrenze<sup>693</sup> im Vergleich zum Flacherzeugnis. Die maximale Kaltverfestigung wird durch die zulässigen Radien von Freiformflächen auf 35 mm begrenzt.<sup>694</sup> Im Bereich der Ausschnitte für Fenster werden derartige Radien i. d. R. nicht vorgesehen. Die Anbindung des Fensters folgt diesem Radius, der den Platzbedarf in der Tür bestimmt.

Aufgrund der bekannten Eigenschaften des Fensterausschnittes wird eine alternative Verwendung<sup>695</sup> zur Bearbeitung bei der Entwicklung des neuen Rahmens antizipiert. Dabei ist das Ziel, der negativen Wertschöpfung, die durch die Herstellung von Neuschrott bedingt wird, durch die Erhöhung des Materialnutzungsgrades über mehrere Transformationssysteme hinweg entgegenzuwirken. Bild 5-3 beschreibt die alternative Verwendung des Fensterausschnittes als Platine zur Substitution von fabrikneuem Flacherzeugnis zur Fertigung desselben Bauteiles. Der Fensterausschnitt hat eine

---

<sup>684</sup> Nach Birkert et al. 2013, S. 504f. entspricht der Materialnutzungsgrad dem Verhältnis aus Bauteilgewicht zu Materialeinsatzgewicht.

<sup>685</sup> Birkert et al. 2013, S. 506

<sup>686</sup> Diese Annahme ist dahingehend begründet, dass thermomechanisch gewalzte Stähle oder Tailored Blanks für aufprallrelevante Bauteile und Bauteile mit Freiformflächen umgeformt werden.

<sup>687</sup> Birkert et al. 2013, S. 506

<sup>688</sup> Annahme, gerundeter Mittelwert aus Materialnutzungsgrad für Rahmen und Außenhaut

<sup>689</sup> Birkert et al. 2013, S. 505

<sup>690</sup> Ćorić et al. 2015, S. 1513ff.

<sup>691</sup> o. V. 1998a, S. 8/6; Gadatsch 2012, S. 99

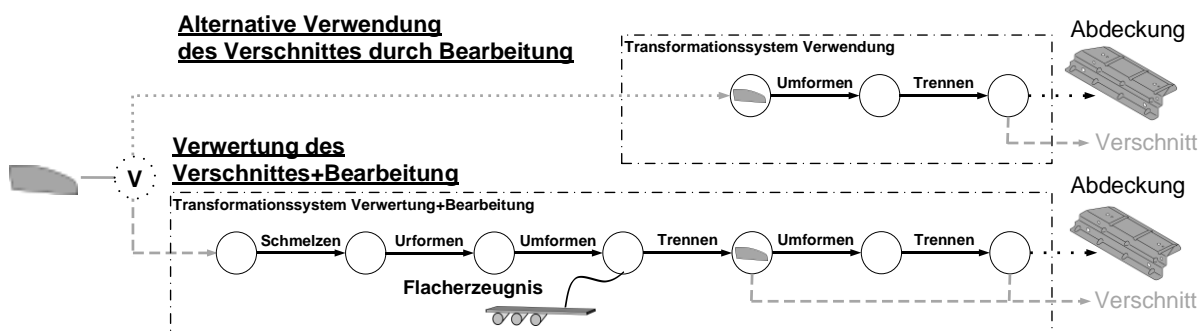
<sup>692</sup> Schmitz und Kopp 1995, S. 136

<sup>693</sup> Schmitz und Kopp 1995, S. 137

<sup>694</sup> Birkert et al. 2013, S. 102

<sup>695</sup> Ćorić et al. 2015, S. 1513ff.; Groche et al. 2015, S. 43ff.

Masse von 2,1 kg.<sup>696</sup> Als Beispiel ist in Bild 5-3 die alternative Verwendung zur Fertigung einer Abdeckung<sup>697</sup> durch die Substitution eines Flacherzeugnisses abgebildet.



**Bild 5-3: Die alternative Verwendung von Verschnitt im Vergleich zur Standard-Verwertung<sup>698</sup>**

Entsprechend der Randbedingung nach Abschnitt 2.1, erfüllt die Abdeckung, gefertigt aus dem Fensterausschnitt, sämtliche Anforderungen.

Anstatt den Fensterausschnitt als Recyclat über schmelzende Prozesse zu verwerten und anschließend zu bearbeiten, wird er in Anlehnung an VDI 2243 zur Substitution von Werkstücken zur Fertigung eines Teiles oder mehrerer Teile verwendet.<sup>699</sup> Im Vergleich zu den üblichen Fabrikationsprozessen der Abdeckung werden sämtliche vorgelagerten Transformationssysteme der Rohstoffgewinnung, der Verarbeitung und der Halbzeug- bzw. Bandfertigung eingespart. Zudem wird die Herstellung von Neuschrott durch das Trennen der Platine aus dem Flacherzeugnis vermieden. Die alternative Verwendung kann unternehmensintern und -übergreifend umgesetzt werden. Zudem muss die Losgrößenkopplung zwischen den verfügbaren Verschnitten und den nötigen Abdeckungen berücksichtigt werden.<sup>700</sup> Da es sich bei der Verwertung des Fensterausschnittes um den Stand der Technik handelt,<sup>701</sup> wird die Verwertung von Schrott zur anschließenden Bearbeitung im Folgenden als Referenz verwendet. Der Gesetzgebende beschreibt diesen Prozess als eine stoffliche Verwertung unter Nutzung stofflicher Eigenschaften.<sup>702</sup>

<sup>696</sup> Geschätzt durch Messungen und skaliert auf den Materialnutzungsgrad von 45,6% nach Birkert et al. 2013, S. 506

<sup>697</sup> Als Beispiel in Bild 5-3 ist die Abdeckung des Abgaskrümmers mit der Originalteilenummer 06F129597F des Referenzfahrzeuges mit einem Gewicht von 2 kg und einem Wert von 50€ gewählt worden. In dem Fahrzeug sind eine Vielzahl möglicher Teile aus Flacherzeugnissen verbaut, beispielsweise die Abdeckung des Turboladers mit der Originalteilenummer 03G129969C, das Hitzeblech mit der Originalteilenummer 038129969A oder der Tankdeckel, die zu einer alternativen Verwendung des Verschnittes antizipierbar sind (vgl. Abschnitt 5.3).

<sup>698</sup> In Anlehnung an Groche et al. 2015, S. 43; Bildnachweis der Abdeckung PartsCats.info 2015

<sup>699</sup> VDI 2243 Blatt 1, S. 10; Allwood et al. 2014, S. 211

<sup>700</sup> Kurz et al. 2009, S. 272

<sup>701</sup> u. a. Pilarsky 2014, S. 90, Westkämper und Warnecke 2010, S. 269 und Klug 2010, S. 406

<sup>702</sup> AltfahrzeugV § 2 Abs. (1) Satz 10; explizit setzt der Gesetzgeber die stoffliche Verwertung mit einer „[...] in einem Produktionsprozess erfolgende Wiederaufarbeitung der Abfallmaterialien für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke [...]“ gleich. Hier wird die in Abschnitt 2.1.2 bereits erwähnte Diskrepanz zwischen dem Verständnis unterschiedlicher Kreislaufprozesse deutlich. VDI 2243, S. 35 versteht unter der Aufarbeitung eine „Behandlung zur Verwendung, [die] in der Regel fertigungstechnisch“ erfolgt. VDI 4082, S. 3 versteht unter der stofflichen Verwertung eine „Wiederaufbereitung der Abfallmaterialien für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke [...]“. Zudem sieht die Produktion nach Abschnitt 3.1.3 keine Aufbereitung von Abfallmaterialien vor.

Die Produktentwicklung steht vor zwei Aufgaben. Zum einen soll das wirtschaftliche Potenzial der alternativen Verwendung für das produktentwicklungsnahe Unternehmen abgeschätzt werden. Zum anderen sollen die ökonomischen, ökologischen wie auch gesellschaftlichen Indikatorwerte ermittelt werden.

## 5.2 Exkurs: Rechtliche Rahmenbedingungen der alternativen Verwendung

Sowohl die Verwendung als auch Verwertung des Fensterausschnittes nach Bild 5-3 tangieren unterschiedliche Bereiche der Gesetzgebung. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen werden i. d. R., insbesondere in der Nachhaltigkeitsdiskussion, vernachlässigt, da entwickelte Methoden der Vergangenheit den damaligen Stand der Technik abbilden (siehe hierzu auch Abschnitt 2.1.2). Erst mit der Einführung des *Abfallbeseitigungsgesetzes* im Jahr 1972 in Deutschland werden abfallrechtliche Rahmenbedingungen in der konstruktionsmethodischen Forschung, beispielsweise als klassische Anforderungen der Beseitigung nach der Nutzung, berücksichtigt. In diesem Abschnitt werden, insbesondere in Bezug auf das Beispiel der alternativen Verwendung des Fensterausschnittes, die rechtlichen Rahmenbedingungen einer alternativen Verwendung beleuchtet. Durch das *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG)* ist beispielsweise eine alternative Verwendung von Materialien innerhalb eines Wertschöpfungsnetzwerkes nicht ohne Weiteres möglich.

Der Gesetzgebende unterscheidet zwischen Produkten, Nebenprodukten eines Herstellungsverfahrens<sup>703</sup> und Abfällen, die ihre Abfalleigenschaft bzw. ihren Abfallstatus<sup>704</sup> verlieren. Stoffe und Gegenstände, die als Nebenprodukt gelten oder ihre Abfalleigenschaft verlieren, erreichen den Produktstatus und verlassen das Abfallregime. Somit entfallen die mit dem Abfallbegriff verbundenen rechtlichen und bürokratischen Pflichten. Werden Stoffe oder Gegenstände mit Produktstatus innerhalb der EU verbracht, so entfällt beispielsweise die Informationspflicht gemäß *Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 über die Verbringung von Abfällen*. Gleichzeitig treten andere Gesetze und Verordnungen in Kraft. Dazu zählen beispielsweise die *Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)-Verordnung)* und das *Produktsicherheitsgesetz (ProdSG)*.

Durch die Substitution von fabrikneuem Flacherzeugnis innerhalb des produktentwicklungsnahen Unternehmens wird der Fensterausschnitt nicht als Abfall angesehen. Da

---

<sup>703</sup> In dieser Arbeit wird zwischen der Verarbeitung bzw. Werkstoffherstellung und der Bearbeitung bzw. Fertigung und Montage unterschieden (vgl. Abschnitt 3.1). Der Gesetzgeber unterscheidet terminologisch nicht zwischen einer Herstellung und einer Produktion.

<sup>704</sup> Weitere Informationen über das vorzeitige Ende der Abfalleigenschaft sind u. a. in KrWG § 5, Bt-Drs 17/6052, S. 76ff., Janz und Schmid-Unterseh 2013, S. 0184 und Schink et al. 2012, S. 41ff., insbesondere für Metallschrott in Verordnung (EU) Nr. 333/2011 § 3 zu finden.

sich der Besitzer, in dem Fall das produktentwicklungsnahe Unternehmen, des Fensterausschnittes nicht „[...] entledigt, entledigen will oder entledigen muss [...]“<sup>705</sup>, fällt er nicht unter die Abfallgesetzgebung, sondern unter das ProdSG. Ist es dem produktentwicklungsnahe Unternehmen nicht möglich, den Fensterausschnitt selbst zu verwerten oder zu verwenden, kann es die Sachherrschaft aufgeben. Danach kann der Fensterausschnitt als Nebenprodukt außerhalb des Abfallregimes für eine Bearbeitung in einem anderen Unternehmen verbracht werden. Entledigt sich der Besitzer des Fensterausschnittes aus gesetzlichen Gründen oder aufgrund fehlender Verwendungsmöglichkeiten fällt er unter die Abfallgesetzgebung und wird verwertet bzw. beseitigt (vgl. Abschnitt 3.1.5). Die Entledigung erfolgt durch eine (stoffliche) Verwertung bzw. ein Recycling oder eine Beseitigung und ist mit dem Abfallbegriff verbunden. Beide Varianten liegen unmittelbar im Geltungsbereich des KrWG.<sup>706</sup>

In dieser Arbeit wird entsprechend Bild 5-3 von der Substitution von Werkstücken durch Verschnitt mit Nebenproduktstatus nach KrWG in einem anderen Produktlebenslauf der Technosphäre durch ein anderes bearbeitendes produktentwicklungsferne Unternehmen ausgegangen.<sup>707</sup> Nach UMWELTBUNDESAMT entfällt dabei die erneute Registrierungspflicht des Fensterausschnittes als Neuschrott entsprechend der REACH-Verordnung.<sup>708</sup>

Damit der Verschnitt als Neuschrott den Nebenproduktstatus zur Bearbeitung erlangt, muss er bei einem Herstellungsverfahren anfallen, dessen Zweck nicht die Herstellung des Verschnittes darstellt.<sup>709</sup> Zudem müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:<sup>710</sup>

1. Eine weitere Verwendung muss sichergestellt sein.
2. Für die weitere Verwendung ist keine über ein normales industrielles Verfahren hinausgehende Vorbehandlung erforderlich.
3. Der Stoff oder Gegenstand wird als integraler Bestandteil eines Herstellungsverfahrens erzeugt.
4. Die weitere Verwendung darf keine negative Wirkung auf Mensch und Umwelt haben.

Das Gesetz definiert das Verständnis eines Herstellungsverfahrens nicht. Nach SCHINK können unter einem Herstellungsverfahren sämtliche Tätigkeiten des Menschen verstanden werden, durch die Stoffe oder Gegenstände hergestellt oder gefördert werden.<sup>711</sup> Die Sicherstellung der weiteren Verwendung „[...]“ setzt eine gesicherte

---

<sup>705</sup> KrWG § 3 Abs. (1)

<sup>706</sup> KrWG § 3 Abs. (2)

<sup>707</sup> Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt, schließt eine Verwendung in einem anderen Produktlebenslauf nicht die Verwendung im produktentwicklungsnahe Unternehmen aus. Hier wird die Ausschöpfung der Potenziale einer unternehmensinternen Verwendung von Verschnitt als Stand der Technik nach VDI 2243 Blatt 1, S. 10 unterstellt. Zudem entfällt der Geltungsbereich des KrWG ohne die Aufgabe der Sachherrschaft über den Verschnitt bei einer unternehmensinternen Verwendung.

<sup>708</sup> Umweltbundesamt 2008, S. 6

<sup>709</sup> KrWG § 4 Abs. (1)

<sup>710</sup> KrWG §4 Abs. 1 Nr. 1.-4.

<sup>711</sup> Schink 2012, S. 206

positive Prognose über ihre [(Nebenprodukte)] geplante Verwendung voraus.“<sup>712</sup> Damit geht ein Absatzmarkt mit positiven Preisen für die Nebenprodukte einher. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die planmäßige bzw. antizipierte Verwendung. „Bereits im Herstellungsverfahren muss nachgewiesen sein, welche Verwendungsabsicht der Produzent mit dem Stoff oder Gegenstand hat.“<sup>713</sup> Die Verwendung wird implizit über eine Wiederverwendung als Prozess, „[...] bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren“<sup>714</sup>, definiert. Entsprechend ist die Verwendung mit dem Produktstatus und einem Zweck verknüpft.

Eine legitime Vorbehandlung entsprechend Nr. 2. liegt vor, wenn das normale industrielle Verfahren mit der üblichen Verarbeitung von Primärprodukten vergleichbar ist.<sup>715</sup> Eine Definition von Primärprodukten oder dem normalen industriellen Verfahren zur Vorbehandlung wird durch den Gesetzgebenden nicht genannt. Unter Primärprodukt wird im Folgenden das Erzeugnis verstanden, welches den Zweck der Bearbeitung darstellt. In Bild 5-3 entspricht der Türrahmen dem Primärprodukt. Zudem wird die Differenzierung des normalen industriellen Verfahrens über eine Abgrenzung zu „abfalltypischen“ Verfahren zur Vorbehandlung eingeführt.<sup>716</sup> Eine genauere Differenzierung für das Beispiel Neuschrott erfolgt entsprechend Abschnitt 3.1. Es wird zwischen den verfahrenstechnischen Verarbeitungs- bzw. Aufbereitungsprozessen und den fertigungstechnischen Bearbeitungs- bzw. Aufarbeitungsprozessen unterschieden. Zudem impliziert der Begriff Verfahren (vgl. Abschnitt 2.1.1), dass der Neuschrott durch das jeweilige bearbeitende Fertigungsverfahren nach DIN 8580 zwangsläufig „nebenher“ entstehen muss (vgl. Abschnitt 3.1.3). Somit sind sämtliche Fertigungsverfahren der DIN 8580, worunter auch die Reinigung als mögliche Vorbehandlung fällt,<sup>717</sup> ein normales industrielles Verfahren. Fertigungstechnische Verfahren sind

„[...] alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern; sie schließen die Verfahren zur Gewinnung erster Formen aus dem formlosen Zustand, zur Veränderung dieser Form sowie zur Veränderung der Stoffeigenschaften ein.“<sup>718</sup>

Verfahrenstechnische Prozesse entsprechen im Zusammenhang mit der Verwertung von Verschnitt keinem normalen industriellen Verfahren, da Stoffe nach Art, Eigenschaft und Zusammensetzung chemisch verändert werden (vgl. Abschnitt 3.1.2) und mit der üblichen Bearbeitung von Primärprodukten nicht vergleichbar sind. Darunter fallen sowohl Zerkleinerungsprozesse zur Herstellung von Schredderschrott, auch

---

<sup>712</sup> Bt-Drs 17/6052, S. 76

<sup>713</sup> Bt-Drs 17/6052, S. 76

<sup>714</sup> KrWG § 3 Abs. (21)

<sup>715</sup> Bt-Drs 17/6052, S. 76

<sup>716</sup> Petersen 2009, S. 1065

<sup>717</sup> DIN 8580, S. 10

<sup>718</sup> DIN 8580, S. 4

wenn es sich dabei um ein fertigungstechnisch ähnliches Verfahren handelt (vgl. Abschnitt 3.1). Entsprechend gilt bei einer Verwertung der Verschnitte nach Bild 5-3 dieser nicht als Nebenprodukt.

„Die Anforderung, dass der Stoff als „integraler Bestandteil“ eines Herstellungsverfahrens erzeugt werden muss, soll gewährleisten, dass der Stoff für eine spätere Verwendung aufbereitet und tatsächlich einer Verwendung zugeführt werden kann.“<sup>719</sup>

Letztlich muss die Verwendung rechtmäßig sein. Daraus resultiert die Erfüllung von Produkt-, Umwelt- und Gesundheitsschutzanforderungen.<sup>720</sup> Sind sämtliche Voraussetzungen erfüllt, dokumentiert und nachgewiesen, erlangt der Verschnitt als Nebenprodukt den Produktstatus und hat somit zu keinem Zeitpunkt Abfalleigenschaften besessen. Damit er den Status eines Nebenproduktes eines Herstellungsverfahrens erhält, reicht eine Sicherstellung der Voraussetzungen 1.-4. nicht aus. Erst durch den Nachweis der Erfüllung der Voraussetzungen kann der Verschnitt außerhalb des Abfallregimes verbracht bzw. transportiert werden. Die Prüfung des Nachweises bleibt den Behörden vorbehalten.<sup>721</sup>

Ein Vorgehen zur Erklärung der Nebenprodukteigenschaften oder der Nachweisführung für Neuschrott existiert zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit nicht.<sup>722</sup> Der Nachweis erfolgt über sämtliche Transformationssysteme, beginnend bei dem Verschnittfertiger über die Vorbehandlung bis hin zur Verwendung durch den Abnehmer durch die Transformation zum Erzeugnis. Das Vorgehen des Nachweises kann an die *Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen* angelehnt werden. Der Verschnittfertiger erbringt den Nachweis über das Herstellungsdatum und zeigt, dass der Verschnitt während eines Herstellungsverfahrens, dessen Zweck nicht die Herstellung des Verschnittes darstellt, angefallen ist. Eine Möglichkeit stellt der Verweis auf trennende Verfahren nach DIN 8580 dar. Sämtliche trennende Fertigungsverfahren beruhen auf dem Prinzip der Fertigung geometrisch bestimmter Körper durch teilweises oder gänzlich Aufheben des Zusammenhaltes von Werkstücken.<sup>723</sup> Somit entspricht der Verschnitt einem integralen Bestandteil der Herstellung. Entspricht die Vorbehandlung einem Fertigungsverfahren nach DIN 8580, liegt ein übliches Verfahren zur Verarbeitung von Primärprodukten vor.

Für den Nachweis einer gesicherten positiven Prognose sind das Verbringungsdatum und die Verwendung beim Verschnittabnehmer nötig.<sup>724</sup> Eine Verwendungsabsicht, beispielsweise durch eine Dokumentation des Antizipierens von Verschnitt- bzw. Werkstückeigenschaften nach Abschnitt 5.1 über Unternehmensgrenzen hinaus,

---

<sup>719</sup> Bt-Drs 17/6052, S. 76

<sup>720</sup> Bt-Drs 17/6052, S. 76

<sup>721</sup> KrWG § 47 Abs. (6)

<sup>722</sup> SMUL 2013 (*Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft-SMUL*) stellt beispielsweise Formblätter für die Verwendung von Gülle als Nebenprodukt der Landwirtschaft in einer Biogasanlage zur Verfügung.

<sup>723</sup> DIN 8580, S. 4

<sup>724</sup> Rs. C- 9/00-„Palin Granit“, R. 39

reicht nicht aus. Übliche Dokumente für den unternehmensübergreifenden Handel wie Kaufverträge und Verbringungsachweise sind entsprechende Hilfsmittel.

Um die vierte Voraussetzung zu erfüllen, stellt der Verschnittfertiger aufgrund des Verursacherprinzips sämtliche Informationen zur Verbringung bereit. Dazu zählen, sowohl die vorgeschriebenen Informationen nach der REACH-Verordnung<sup>725</sup>, als auch durch Normen geregelte Informationen wie die nach DIN EN 10021. Die Informationen der Stoffeigenschaften nach der REACH-Verordnung liegen bereits durch den Zulieferer des Flacherzeugnisses vor. Zudem ermöglicht DIN EN 10021 Absprachen bezüglich von der Norm abweichender Lieferbedingungen zwischen Fertiger und Abnehmer,<sup>726</sup> sodass nicht für jeden Neuschrott umfangreiche Ergänzungen der abhängigen fertigungstechnischen Eigenschaften in den Datenblättern nötig sind.

### 5.3 Exkurs: Eine Methode des Antizipierens alternativer Verwendungen<sup>727</sup>

I. d. R. besteht kein unternehmensübergreifender Austausch von Informationen bezüglich erzeugter Verschnitte und für die Fertigung benötigter Werkstücke.<sup>728</sup> Um mögliche unternehmensübergreifende Synergien zur alternativen Verwendung zu entdecken, ist eine objektorientierte Datenbank in *Java* implementiert worden.<sup>729</sup> Sie ermöglicht eine geometrische und stoffliche Erfassung von Verschnitten als auch von Werkstücken. Um die Komplexität möglicher geometrischer Merkmale zu verringern und die Geheimhaltung zu wahren, werden sowohl Verschnitte wie auch Werkstücke durch abstrahierende und reglementierte Geometriemerkmale erfasst. Sie werden durch einfache zweidimensionale geometrische Objekte (ezgO) abgebildet (vgl. Bild 5-4). Das ezgO des Werkstückes entspricht der Individualisierung des Partialmodelles der ezgO (vgl. Bild 5-4: rechts; dieses Partialmodell dient zur Individualisierung sowohl des Verschnittes als auch von Werkstücken) durch die Eigenschaften der Platine nach dem Trennen aus dem Flacherzeugnis nach Bild 5-3 beispielsweise. Von CAx-Daten wird aufgrund der Geheimhaltung und der Verfügbarkeit von CAx-Daten von Werkstücken wie Halbfertigteilen oder Verschnitten abgesehen.

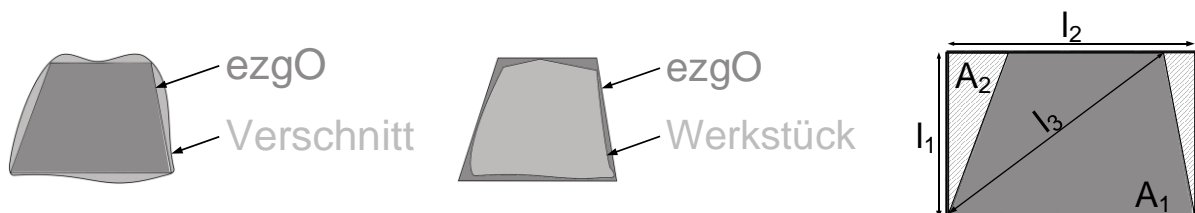


Bild 5-4: Abbildung realer Geometrien durch ezgO

<sup>725</sup> REACH-Verordnung Art. 33-35

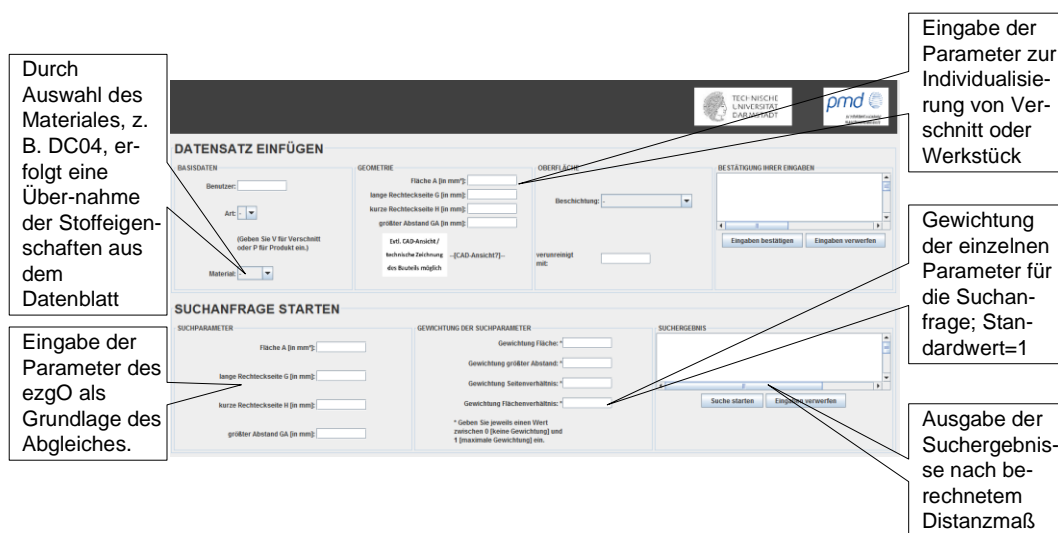
<sup>726</sup> Becker et al. 1992, S. 4

<sup>727</sup> Der Autor bedankt sich bei den Herren Schell und Reiter, die im Rahmen von durch den Autor betreuten studentischen Arbeiten und Hilfswissenschaftlertätigkeiten zu diesem Abschnitt beitragen.

<sup>728</sup> Groche et al. 2015, S. 43ff. zeigen das Potenzial des Informationsaustausches durch *Industrie 4.0.* im Zusammenhang mit dem Antizipieren alternativer Verwendungsmöglichkeiten von Neuschrott auf.

<sup>729</sup> Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit hat die Datenbank in einer Alpha-Version vorgelegen.

Als Merkmale des Partialmodelles der ezgO für die Abmessungen werden die Fläche  $A_1$  und der größte Abstand zweier Punkte  $l_3$  herangezogen. Als Merkmale zur Abbildung der Proportionen und der Form dienen das Seitenverhältnis  $l_2/l_1$  des kleinsten umfassenden Rechteckes, welches das ezgO umschließt und das Flächenverhältnis zwischen ezgO und dem kleinsten umfassenden Rechteck  $A_1/A_2$ . Durch die Berechnung einer geometrischen Distanzfunktion zwischen dem ezgO des Verschnittes und dem des Werkstückes wird in der Datenbank nach geometrisch ähnlichen ezgO gesucht. Bild 5-5 zeigt die grafische Benutzeroberfläche der Datenbank. Die Datenbank sortiert das Ergebnis des Abgleiches anhand des individualisierten Distanzmaßes.



**Bild 5-5: Die grafische Benutzeroberfläche der Datenbank**

Übertragen auf das Antizipieren einer alternativen Verwendung des Fensterausschnittes ist die Platine zur Fertigung der Abdeckung als Werkstück in die Datenbank implementiert worden. Eine Suche der Produktentwicklung der Fahrzeugtür anhand der Merkmale des Fensterausschnittes hat als Suchergebnis die Platine als ezgO mit dem geringsten berechneten Distanzmaß ausgegeben.

## 5.4 Anwendung der Methodik der Nachhaltigkeitsbilanzierung

Im Folgenden werden die Schritte der Methodik der Nachhaltigkeitsbilanzierung nach Kapitel 4 am Beispiel der alternativen Verwendung des Fensterausschnittes durchgeführt.

### 5.4.1 Das Ziel und der Untersuchungsrahmen

Das Ziel der Bilanzierung ist die Abschätzung der Nachhaltigkeit der antizipierten alternativen Verwendung des Fensterausschnittes auf Grundlage der Grobgeometrie des Claymodelles bzw. des Class-A-Modelles des Exterieurs auf der Konkretisierungsebene des Konzeptes. Die Bilanzierung erfolgt über zwei Betrachtungsschwerpunkte. Zum einen wird das Kostensenkungspotenzial durch die alternative Verwendung über die Bearbeitungskosten des produktentwicklungsnahen Unternehmens abgeschätzt. Zum anderen sind die Nachhaltigkeitsindikatorwerte zu bestimmen. Die ökonomischen

Anforderungen werden durch die Zielkosten von 42€ für die strukturelevanten Bauteile der Tür bzw. die daraus resultierenden Materialkosten für den Rahmen von 8,66€ (siehe Abschnitt A.3.1) festgelegt. Ökologische und gesellschaftliche Anforderungen werden nicht definiert. Als prozessuale Einheit wird die Fertigung zum absetzbaren Produkt festgelegt. Für die produktentwicklungsnahen Bearbeitungsprozesse sind damit die Gegenstände Rahmen für die Tür und Fensterausschnitt zur alternativen Verwendung<sup>730</sup> gemeint. Der restliche Verschnitt<sup>731</sup> und weitere Koppelprodukte wie die Schlacke aus Frischungs- oder Reduktionsprozessen des betrachteten Produktlebenslaufes werden in einer ersten Verwertung in den produktentwicklungsfernen Transformationssystemen soweit ver-<sup>732</sup> bzw. anschließend bearbeitet, dass Zement bzw. der Fensterausschnitt als Flacherzeugnis vorliegen. Die Nachhaltigkeitsbilanzierung wird um den Neuschrott, der während des ersten Verwertungskreislaufes und der anschließenden Bearbeitung zu einem Flacherzeugnis hergestellt wird, abgeschnitten. Die Systemgrenze der Bilanzierung wird aus Gründen fehlender Daten aus der Eisenerzgewinnung und der Transformationssysteme zur Verarbeitung des Eisenerzes zu Konzentraten festgelegt. In der Bundesrepublik Deutschland wird weder Eisenerz gewonnen noch wird das Erz zu Konzentraten verarbeitet.<sup>733</sup> Nach TRIEBSKORN sind die Hauptimportländer für Eisenerzkonzentrat Brasilien mit 55,4 %, Kanada mit 17 % und Schweden mit 13,3%.<sup>734</sup> Für Kanada bzw. Schweden können zu den in Abschnitt 4.3 vorgestellten Partialmodellen Daten über das *North American Industry Classification System* 212210 *Iron ore mining* bzw. über die Klassifikation 1310000 *Järnmalm* bezogen werden. Für Brasilien<sup>735</sup> als Hauptimportland sind diese Daten nicht verfügbar.<sup>736</sup> Dadurch werden sämtliche Transformationssysteme, die nicht in Deutschland stattfinden, für die Ökono- und Soziosphäre abgeschnitten und nicht in der Bilanzierung berücksichtigt. Die Berücksichtigung der Wirkung nicht in Deutschland ver- oder bearbeiteter Materialien auf die Ökosphäre ist mit dem Partialmodell der Ökosphäre konsistent (vgl. Abschnitt 3.2). Entsprechend werden agglomerierte Erze über die Betrachtungsgrenze als Eingangsfluss transportiert. Zudem werden Materialien, die nicht unmittelbar mit den Transformationssystemen des Produktlebenslaufes über Flüsse in Verbindung stehen, abgeschnitten. Das betrifft beispielsweise die Gewinnung von Gips zur

<sup>730</sup> Nach Abschnitt 3.1 entspricht die Verwertung des Verschnittes einer Verwertung des Stoffes. Die Verwendung ist mit der Bearbeitung von Gegenständen gleichzusetzen.

<sup>731</sup> Hier wird die Annahme getroffen, dass der Verschnitt als Kühlschrott mit einem Gewichtsanteil von 18 % nach BMUB 2010, S. 4 dem schmelzflüssigen Eisen vor dem Frischungsprozess zugeführt wird. Nach o. V. 1998b, S. 13/3 kann der Anteil des Schrottes bis 22 % betragen.

<sup>732</sup> Nach Schenk 1998, S. 215, Economic Commission for Europe 1993, S. 74f. und Walter und Pearce 1978, S. 223 werden Tiefziehstähle über die Hochofenroute hergestellt.

<sup>733</sup> Statistisches Bundesamt 2014, S. 9; Statistisches Bundesamt 2014, S. 17

<sup>734</sup> Triebskorn 2012, S. 337

<sup>735</sup> Brasilien hat nach Malik 2014, S. 161 einen HDI von 0,744 und gehört somit zu den Staaten mit hohem Index für die menschliche Entwicklung (vgl. Abschnitt 3.2.3).

<sup>736</sup> Neben der Recherche in deutscher und englischer Sprache sind u. a. folgende portugiesischen Suchbegriffe für die Recherche beim brasilianischen statistischen Bundesamt *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* und in anderen Quellen in verschiedenen Kombinationen und Deklinationen verwendet worden: *minério de ferro* portugiesisch für Eisenerz, *estatística* portugiesisch für Statistik, *Serviço de Estatística empregado* portugiesisch für Beschäftigte, *produção* bzw. *volume de produção* portugiesisch für Produktion bzw. Produktionsmenge, *volume de negócios* portugiesisch für Umsatz, *produtividade do trabalho* portugiesisch für Arbeitsproduktivität, *toneladas* portugiesisch für die Masseneinheit Tonne oder die brasilianische Währung *Real*, plural *Réis* bzw. *BRL* und *R\$*.

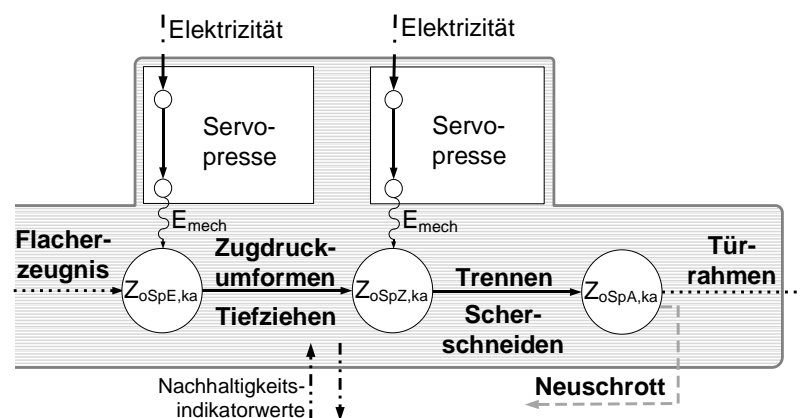
Herstellung von Zement aus der Schlacke der Verarbeitung des Erzes zu einem Stahlwerkstoff. Zudem werden die Transportprozesse nicht berücksichtigt, da sie unabhängig von der alternativen Verwendung stattfinden. Für die Bilanzierung des Konzeptes wird zusätzlich davon ausgegangen, dass sämtliche Materialflüsse der Fabrikationsprozesse, die nicht Bestandteil des zu entwickelnden Produktes sind, bereits in den verfügbaren Daten aus den in Abschnitt 4.3 genannten Quellen aggregiert worden sind.<sup>737</sup> Zudem hat die alternative Verwendung des Fensterausschnittes keine Wirkung auf die Nutzungs- und Kreislaufprozesse nach der Nutzung. Sie sind unabhängig von der alternativen Verwendung und sind äquivalent zu den Nutzungs- und Kreislaufprozessen des Rahmens sowie der Abdeckung aus fabrikneuen Flacherzeugnissen.

#### 5.4.2 Antizipieren der Transformationssysteme

In Anlehnung an Abschnitt 3.1 wird in diesem Beispiel bei dem Antizipieren von Transformationssystemen zwischen der Verarbeitung und der Bearbeitung unterschieden. Zur Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte im nächsten Arbeitsschritt werden die Material- und Energieflüsse der Transformationssysteme antizipiert. Dabei werden ausgehend von dem Partialmodell der Technosphäre nach Abschnitt 3.1 die relevanten Transformationssysteme innerhalb und außerhalb des Lebenslaufes des zu entwickelnden Türrahmens entsprechend der Informationsverfügbarkeit auf den Abstraktionsebenen des Prozessmodelles nach Abschnitt 4.5 individualisiert.

##### 5.4.2.1 Antizipieren der Referenz

Durch die Lieferverträge ist zu Beginn des Teilprozesses des Konzipierens die produktentwicklungsnahen Bearbeitung eines Flacherzeugnisses zu dem Fahrzeugrahmen auf der Konkretisierungsebene des Konzeptes des Bauteiles a (ka) in Form des Class-A-Modelles festgelegt. Zunächst wird der produktentwicklungsnahen Bearbeitungsprozess des zu entwickelnden Türrahmens über die Servopressen als Operatoren mit der Bezeichnung *Pressenstraße* antizipiert (vgl. Bild 5-6 entsprechend Abschnitt 5.1).



**Bild 5-6: Das produktentwicklungsnahen Transformationssystem<sup>738</sup> der *Pressenstraße* zur Bearbeitung des Flacherzeugnisses zu einem Türrahmen als Referenz**

<sup>737</sup> Somit gelten hier die Abschneidekriterien, die bei der Synthese der Daten festgelegt worden sind.

<sup>738</sup> Die Nomenklatur der Zustände entsprechend den Indizes nach Abschnitt 4.3.

Für das Transformationssystem wird zur zweckdienlichen Änderung des Flacherzeugnisses zu dem Fahrzeugtürrahmen ausschließlich Energie durch den Torquemotor der Servopresse gewandelt. Durch die am Flacherzeugnis verrichtete mechanische Arbeit wird das Flacherzeugnis tiefgezogen und nicht benötigtes Material schergeschnitten. Tabelle 5-1 beinhaltet die antizipierten spezifischen Flüsse an Energie und Material.

Tabelle 5-1: Antizipierte spezifische Flüsse an Energie und Material je kg Rahmen<sup>739</sup> der Referenz

Material i	Spez. Menge	Einheit	Quelle/Vereinfachungen/Verkürzungen
Flacherzeugnis	2,193	kg/kg	Nach Birkert et al. 2013, S. 506 hat die Fertigung von Türrahmen einen Materialausnutzungsgrad von 45,6 %.
Elektrizität	$4,14 \times 10^{-6}$	TJ/kg	Berechnet über mittleren Energieumsatz einer Pressenstraße mit sechs Servopressen nach Birkert et al. 2013, S. 451f. in Joule
Neuschrott	1,193	kg/kg	
Türrahmen	1	kg	

Das Transformationssystem zur Bearbeitung des Flacherzeugnisses zu der Abdeckung (ab) auf der Konkretisierungsebene des Konzeptes (kab) wird in Bild 5-7 entsprechend Abschnitt 5.1 modelliert. Die Operanden der Bearbeitung des Flacherzeugnisses zu der Abdeckung sind nicht bekannt. Es wird angenommen, dass die Prozesse durch die gleichen Verfahren wie bei der Bearbeitung des Türrahmens realisiert werden.

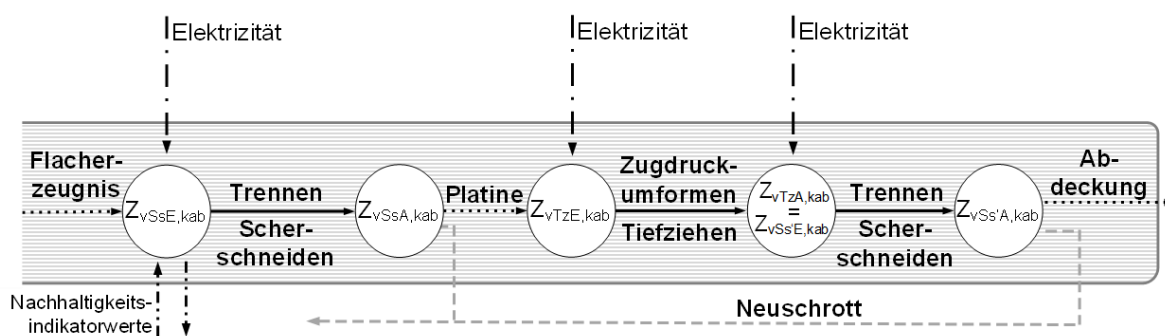


Bild 5-7: Das produktentwicklungsferne Transformationssystem aus Verfahren zur Bearbeitung des Flacherzeugnisses zu der Abdeckung (Fertigung ab) als Referenz

Ausgehend von dem Flacherzeugnis wird zunächst als Halbfertigteil eine Platine aus dem Flacherzeugnis schergeschnitten, die anschließend stufenweise zu dem Fertigteil tiefgezogen und schergeschnitten wird. Tabelle 5-2 fasst die spezifischen Material- und Energiemengen je Kilogramm Abdeckung zusammen.

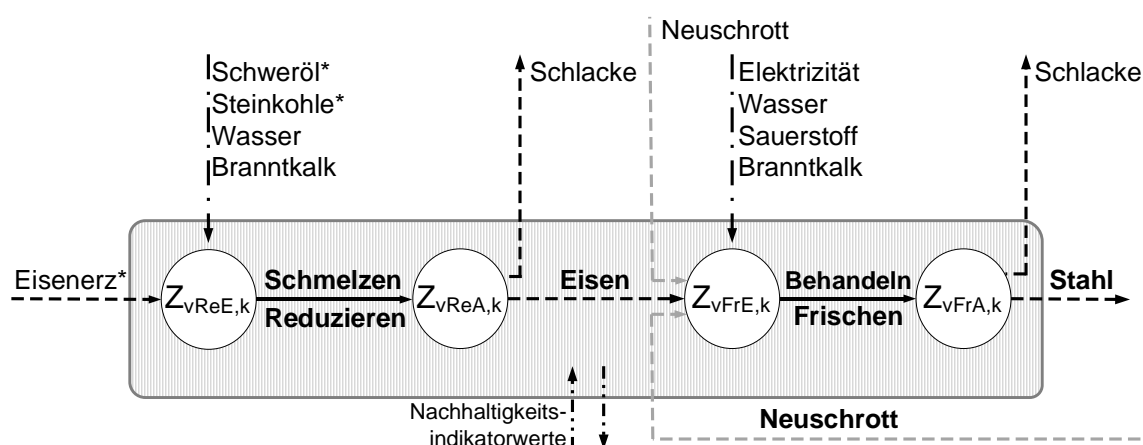
<sup>739</sup> Aus Gründen der Konsistenz mit der Ökobilanz werden keine absoluten Materialflüsse je Ausgangsmenge angegeben. Diese werden durch die Multiplikation mit der globalen Variablen berechnet, was während der Synthese in Abschnitt 5.4.3 erfolgt. Die Multiplikation ergibt die Mengen an Material oder Energie der Formeln in Abschnitt 4.3. Somit sind die Werte auf Grundlage der Literatur auf andere Probleme übertrag- und damit operationalisierbar (vgl. Abschnitt 4.5).

Tabelle 5-2: Antizipierte spezifische Flüsse an Energie und Material je kg Abdeckung der Referenz

Material i	Spez. Menge	Einheit	Quelle/Vereinfachungen/Verkürzungen
Flacherzeugnis	1,6	kg/kg	Annahme
Elektrizität <sup>740</sup>	2,07x10 <sup>-6</sup>	TJ/kg	Annahme einer Pressenstraße mit drei Ser-vopressen nach Birkert et al. 2013, S. 451f. in Joule
Neuschrott	0,6	kg/kg	
Abdeckung	1	kg	

Die produktentwicklungsfernen Transformationssysteme zur Ver- und Bearbeitung von Materialien zu dem Flacherzeugnis werden ebenfalls antizipiert. Sie unterscheiden sich zwischen Türrahmen und der Abdeckung nicht. Da für die Fertigung von Karosserien ausschließlich kaltgewalzte Bleche als Flacherzeugnisse bearbeitet werden,<sup>741</sup> sind die Verarbeitung von Erzen und die anschließende Bearbeitung zum Flacherzeugnis antizipierbar.

Bild 5-8 modelliert das Transformationssystem der Verarbeitung des Eisenerzes zu einem schmelzflüssigen Stahlwerkstoff.



**Bild 5-8: Die Verarbeitung von Eisenerz zu einem schmelzflüssigen Stahlwerkstoff durch Prozesse; mit \* markierte Flüsse werden nicht in Deutschland gewonnen oder verarbeitet**

Das Eisenerz wird zunächst durch Schweröl und Steinkohle als Energieträger, dem Branntkalk als Zuschlag und dem Wasser<sup>742</sup> zum Kühlen der Reduktionsanlage aus anderen Produktlebensläufen der Technosphäre zu einem schmelzflüssigen Eisenwerkstoff<sup>743</sup> reduziert. Weder das Eisenerz (vgl. Abschnitt 5.4.1) noch das Schweröl<sup>744</sup>

<sup>740</sup> Die benötigte Elektrizität ist in diesem Beispiel auf der Abstraktionsebene von Verfahren antizipierbar. Sie ist nicht mit der Wirkgröße eines Operatoren zu verwechseln.

<sup>741</sup> Birkert et al. 2013, S. 29

<sup>742</sup> Es werden aus Gründen der Übersichtlichkeit die Transformationssysteme auf Prozessebene der Technosphäre nicht abgebildet. Sie werden entsprechend dem Verkürzungsmerkmal der unmittelbaren Verbindung durch Materialflüsse mit dem Produktlebenslauf des zu entwickelnden Produktes nach Abschnitt 5.4.1 berücksichtigt und in Bild A-2 und Bild A-3 dargestellt (siehe auch Tabelle 5-16).

<sup>743</sup> In der Literatur und im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff Roheisen verwendet. Aufgrund des Verständnisses des Adjektives roh nach Abschnitt 2.1.2, wird in dieser Arbeit *schmelzflüssiges Eisen* als Bezeichnung für den Stoff aus der Eisenherstellung verwendet.

<sup>744</sup> Statistisches Bundesamt 2014, S. 93f.

und die Steinkohle<sup>745</sup> werden in Deutschland gewonnen oder verarbeitet. Die Bauart des Hochofens bzw. des Cowpers als Operatoren sind nicht antizipierbar. Tabelle 5-3 fasst die antizipierten spezifischen Flussmengen zur Herstellung eines Kilogrammes schmelzflüssigen Eisens zusammen.

Tabelle 5-3: Antizipierte spezifische Flüsse an Energie und Material je kg Eisen

Material i	Spez. Menge	Einheit	Quelle/Vereinfachungen/Verkürzungen
Eisenerz	1,616	kg/kg	BUMB 2008, S. 4, um Mineralstoffe zur Pal- letherstellung verkürzt, Eisenpellets und -erz und -sinter unter Eisenerz zusammenge- fasst, Steinkohle-DE-Koks und Steinkohle- DE-Vollwert-subv-2010 unter Steinkohle zu- sammengefasst.
Schweröl	$9,66 \times 10^{-7}$	TJ/kg	
Steinkohle	$1,31 \times 10^{-5}$	TJ/kg	
Wasser	5,24	kg/kg	
Branntkalk	0,03	kg/kg	
Schlacke	0,12	kg/kg	Marincek 1964, S. 125
Eisen	1	kg	

Ca. 97 % des in Deutschland hergestellten schmelzflüssigen Eisens wird in der Stahlherstellung verarbeitet.<sup>746</sup> Das schmelzflüssige Eisen wird durch die Zugabe von Neuschrott als Recyclat, Branntkalk, Sauerstoff und Wasser zur Kühlung des Operators zu einem schmelzflüssigen Stahlwerkstoff gefrischt. Der Neuschrott dient als sog. Kühlschrott zur Kühlung des exothermen Frischungsprozesses. Der Kühlschrott wird aufgrund seiner Eigenschaften als Qualitätsschrott bezeichnet.<sup>747</sup> Der Schrott kann aus der Stahlherstellung selbst<sup>748</sup>, dem betrachteten oder einem anderen Produktlebenslauf stammen. Wie bei der Reduktion sind die Operatoren nicht antizipierbar. Aufgrund der in Abschnitt 5.4.1 definierten prozessualen Einheit werden zwei Fälle unterschieden und antizipiert:

1. Der Neuschrott aus anderen Produktlebensläufen dient zur Herstellung des Stahles für die Fertigung des Längserzeugnisses der Abdeckung und des Türrahmens. Dieser Fluss an Neuschrott ist unabhängig von den antizipierten Transformationssystemen.
2. Der Neuschrott aus dem betrachteten Produktlebenslauf wird im ersten Kreislauf zu Flacherzeugnissen verarbeitet. Der Fluss an Neuschrott ist abhängig von den antizipierten Transformationssystemen.

<sup>745</sup> Statistisches Bundesamt 2014, S. 16

<sup>746</sup> Ghenda 2011, S. 53

<sup>747</sup> o. V. 1998a, S. 8/6; Rehkopf 2006, S. 19

<sup>748</sup> Das Verwerten des Eigenschrottes ist durch BMUB 2010, S. 4 nicht berücksichtigt worden.

In Tabelle 5-4 sind die antizipierten spezifischen Material- und Energieflüsse des Frischens zu finden.

Tabelle 5-4: Antizipierte spezifische Flüsse an Energie und Material je kg Stahl

Material i	Spez. Menge	Einheit	Quelle/Vereinfachungen/Verkürzungen
Eisen	0,934	kg/kg	BMUB 2010, S. 4, um Refraktär-Keramik verkürzt
Elektrizität	$5 \times 10^{-8}$	TJ/kg	
Sauerstoff	0,07	kg/kg	
Neuschrott	0,18	kg/kg	
Wasser	3	kg/kg	
Branntkalk	0,05	kg/kg	Rehkopf 2006, S. 22
Schlacke	0,12	kg/kg	
Stahl	1	kg	

Sowohl aus dem Reduktions- als auch aus dem Frischungsprozess wird Schlacke zu anderen Produktlebensläufen transportiert. Für dieses Beispiel wird angenommen, dass sie zur Herstellung von Hüttenzement<sup>749</sup> über das Trockenverfahren<sup>750</sup> verwertet wird (vgl. Abschnitt 5.4.1). Unter der Umsetzung von elektrischer Energie werden die Schlacke, der Kalkmergel und der Gips in Mühlen gemahlen und anschließend in Öfen gebrannt. Das Ergebnis dieser Transformation ist der fertige Zement, der anderen Produktlebensläufen zur Verfügung gestellt wird.

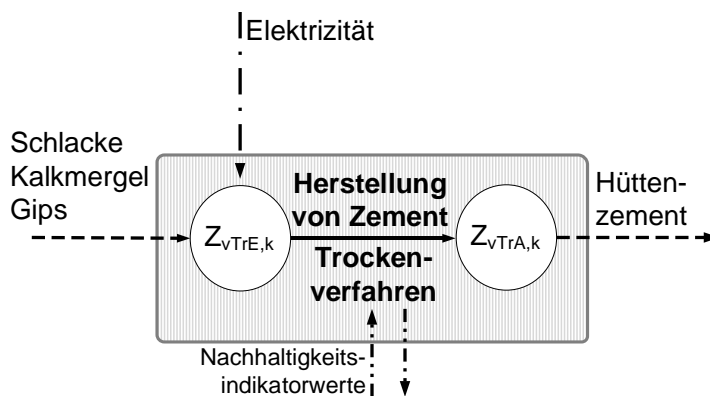


Bild 5-9: Die Verwertung der Schlacke zur Herstellung von Zement

<sup>749</sup> Je nach Art des Zementes kann nach DIN 1164-10, S. 7 der Schlackeanteil über 50% betragen; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2014, S. 8 hat einen Anteil von 56% bilanziert.

<sup>750</sup> Nach Neumann 1939, S. 518 wird das Herstellen von Zement aus Schlacke, Gips und Kalk durch das Trockenverfahren (Tr) realisiert.

Tabelle 5-5 fasst die spezifischen Material- und Energieflüsse zur Herstellung eines Kilogrammes Zement zusammen.

Tabelle 5-5: Antizipierte spezifische Flüsse an Energie und Material je kg Zement

Material i	Spez. Menge	Einheit	Quelle/Vereinfachungen/Verkürzungen
Elektrizität	$3,25 \times 10^{-7}$	TJ/kg	BMUB 2015, S. 4
Gips	0,04	kg/kg	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2014, S. 8, wird aufgrund der Randbedingung eines unmittelbaren Materialflusses nach Abschnitt 5.4.1 abgeschnitten
Kalkmergel	0,4	kg/kg	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2014, S. 8
Schlacke	0,56	kg/kg	
Zement	1	kg	

Der hergestellte schmelzflüssige Stahl wird anschließend über die urformenden und umformenden Prozesse zu dem Flacherzeugnis bearbeitet (vgl. Bild 5-10).

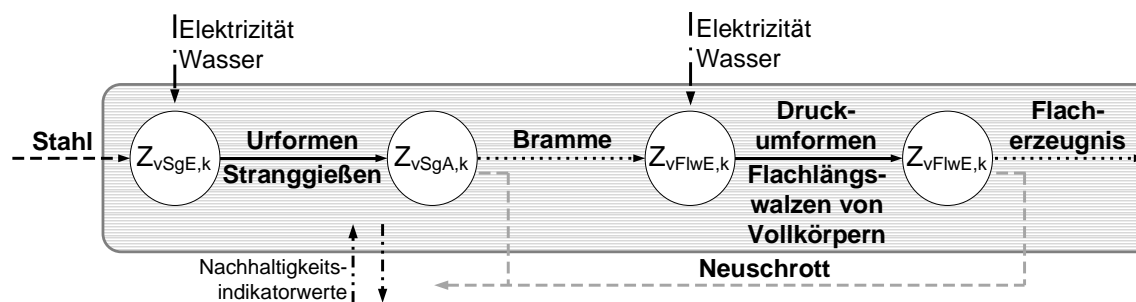


Bild 5-10: Die Bearbeitung von schmelzflüssigem Stahl zu dem Flacherzeugnis durch Verfahren<sup>751</sup>

Aufgrund der festgelegten kaltgewalzten Flacherzeugnisse sind die Transformationssysteme über die Verfahren antizipierbar. Zudem werden in Deutschland ca. 97% des hergestellten schmelzflüssigen Stahles durch das Fertigungsverfahren Stranggießen urgeformt.<sup>752</sup> Das Stranggießen transformiert den formlosen Werkstoff zu einem fertigungstechnisch bearbeitbaren Gegenstand.<sup>753</sup> Dabei fließt der schmelzflüssige Stahl durch eine mit Wasser gekühlten Operator und es bildet sich eine erstarrte Strangschale.<sup>754</sup> Der Operator des Verfahrens, beispielsweise Kokille oder Kaltkammer, ist nicht antizipierbar. Mithilfe von elektrisch angetriebenen Treibrollen wird der Strang gezogen und somit kann schmelzflüssiger Stahl weiter nachfließen. Der Strang wird aktiv durch Wasser und passiv über freie Konvektion gekühlt. Ist der Strang völlig erstarrt, werden Brammen getrennt. Zusätzlich zu den Brammen entsteht Schrott in Form der Anfangs- und Endstücke eines Stranges. Sie werden zum Frischen nach

<sup>751</sup> Das Stranggießen ist nach BMUB 2002 um entsorgte, nicht gefährliche Abfälle und entsorgte radioaktive Abfälle verkürzt. Das Kaltwalzen nach BMUB 2011 ist um gefährliche Abfälle zur Deponie, entsorgte, nicht gefährliche Abfälle, entsorgte radioaktive Abfälle und Stoffe für die Energierückgewinnung verkürzt.

<sup>752</sup> Wirtschaftsvereinigung Stahl Stahlinstitut VDEh 2013, S. 13

<sup>753</sup> DIN 199 Blatt 1, S. 12

<sup>754</sup> Weissbuch 2006, S. 4ff.

Bild 5-8 geleitet. Tabelle 5-6 fasst die antizipierten spezifischen Flüsse der Bearbeitung des schmelzflüssigen Stahles zu Brammen zusammen.

**Tabelle 5-6: Antizipierte spezifische Flüsse an Energie und Material je kg Bramme**

Material i	Spez. Menge	Einheit	Quelle/Vereinfachungen/Verkürzungen
Stahl	1,267	kg/kg	BMUB 2002, Energien zusammengefasst, Einsatz von Sekundärstoffen durch Neuschrott ersetzt
Wasser	1271	kg/kg	
Elektrizität	$2,63 \times 10^{-5}$	TJ/kg	
Neuschrott	0,267	kg	
Bramme	1	kg	

Anschließend werden die Brammen zu Flacherzeugnissen druckumgeformt.<sup>755</sup> Der Prozess des Druckumformens wird durch das Verfahren *Flach-Längswalzen von Vollkörpern* realisiert.<sup>756</sup> Dabei wird die Bramme vor dem Walzen über die Rekristallisationstemperatur erwärmt.<sup>757</sup> Der durch das Erwärmen entstandene Ofenzunder wird mit einem Zunderwäscher mithilfe von Presswasser entfernt.<sup>758</sup> Anschließend erfolgt das mehrstufige Walzen in sogenannten Gerüsten.<sup>759</sup> Die Bauart, die Anzahl und die Anordnung der Gerüste sind nicht antizipierbar. Durch das Glühen nach dem Kaltwalzen werden die mechanischen Eigenschaften des Kaltbandes für den Türrahmen, bspw. nach DIN EN 10130<sup>760</sup>, eingestellt. Zur Konfektionierung des Bandes erfolgt ein Zerteilprozess, der durch Messerschneiden<sup>761</sup> realisiert wird.<sup>762</sup> Der Prozess der Kaltbandfertigung erzeugt das fertige Band zur Fertigung des Türrahmens sowie der Abdeckung und den Neuschrott in Form von Säumen. Der Materialnutzungsgrad der Kaltbandfertigung beträgt, bezogen auf die Brammenmasse, zwischen 83 % bei Schmalbändern und 86,5 % bei Breitbändern.<sup>763</sup> Der Neuschrott wird zu dem Frischen nach Bild 5-8 transportiert. Die spezifischen Mengen der Materialien und Energien sind Tabelle 5-7 zu entnehmen.

**Tabelle 5-7: Antizipierte spezifische Flüsse an Energie und Material je kg Flacherzeugnis**

Material i	Spez. Menge	Einheit	Quelle/Vereinfachungen/Verkürzungen
Bramme	1,135	kg/kg	Müller 1991, S. 170
Elektrizität	$5,5 \times 10^{-5}$	TJ/kg	BMUB 2011, Energien zusammengefasst, um Einsatz von Sekundärstoffen verkürzt
Wasser	1271	kg/kg	
Neuschrott	0,135	kg/kg	
Flacherzeugnis	1	kg	

<sup>755</sup> Birkert et al. 2013, S. 29f.

<sup>756</sup> DIN 8583 Blatt 2, S. 4

<sup>757</sup> Specht und Becker 2014, S. M 23f.

<sup>758</sup> Knepe 2012, S. 142

<sup>759</sup> Knepe 2012, S. 136ff.

<sup>760</sup> DIN EN 10130, S. 11

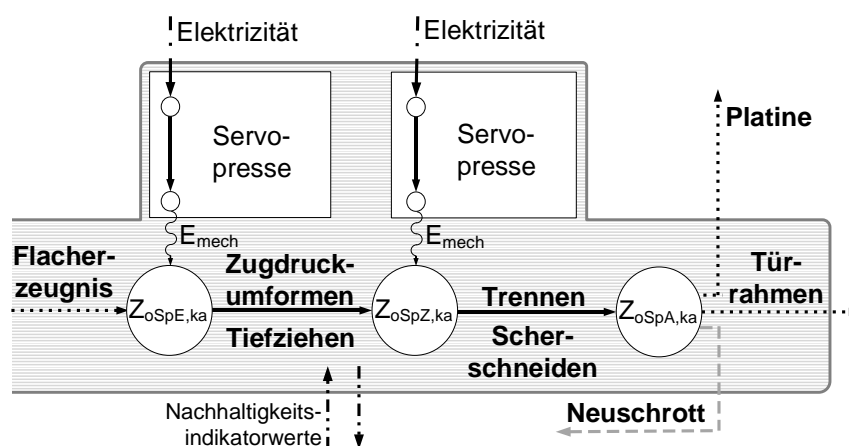
<sup>761</sup> DIN 8588, S. 5

<sup>762</sup> Mathewis und Pawelski 2012, S. 158

<sup>763</sup> Müller 1991, S. 170

### 5.4.2.2 Antizipieren der alternativen Verwendung

Bei der alternativen Verwendung des Fensterausschnittes der Rahmenfertigung durch die Fertigung der Abdeckung nach Abschnitt 5.1 ändern sich die antizipierten Transformationssysteme der Herstellung des Eisens und des Stahles nach Bild 5-8 und der Fertigung der Bramme und des Längserzeugnisses nach Bild 5-10 nicht.<sup>764</sup> Änderungen erfahren die Transformationssysteme der Rahmenfertigung (vgl. Bild 5-11) und der Fertigung der Abdeckung über die Materialein- und -ausgänge.



**Bild 5-11:** Das produktentwicklungsnahe Transformationssystem der alternativen Verwendung der Pressenstraße zur Bearbeitung des Flacherzeugnisses zu einem Türrahmen und der Platine

Das Transformationssystem der Rahmenfertigung ändert sich durch die Bearbeitung des Flacherzeugnisses zu der Platine anstelle eines Anteiles des Neuschrottes. Dabei ändern sich die Verhältnisse zwischen den spezifischen Mengen gefertigter Gegenstände und denen des hergestellten Neuschrottes als Stoff.

Tabelle 5-8 fasst die spezifischen Flüsse der antizipierten alternativen Verwendung zusammen. Im Vergleich zu Tabelle 5-1 sinkt die spezifische Menge erzeugten Neuschrottes um 20 %.

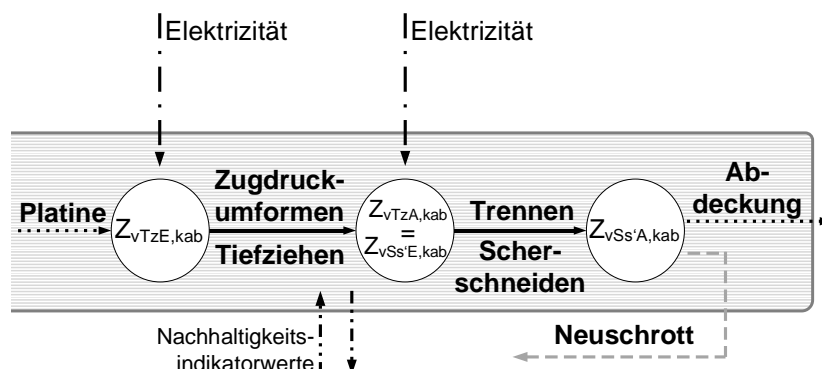
**Tabelle 5-8:** Antizipierte spezifische Flüsse an Energie und Material je kg Rahmen der alternativen Verwendung

Material i	Spez. Menge	Einheit	Quelle/Vereinfachungen/Verkürzungen
Flacherzeugnis	2,193	kg/kg	Siehe Tabelle 5-1
Elektrizität	$4,14 \times 10^{-6}$	TJ/kg	Siehe Tabelle 5-1
Platine	0,23	kg/kg	Fn. 696
Neuschrott	0,963	kg/kg	
Türrahmen	1	kg/kg	

Durch die Nutzung der Synergien zwischen der Rahmenfertigung und der Fertigung der Abdeckung ändert sich das Transformationssystem zur Fertigung der Abdeckung.

<sup>764</sup> Dass weniger Neuschrott durch die alternative Verwendung zum Frischen transportiert wird, wird nach Fußnote 708 in der Synthese berücksichtigt, das ändert an den antizipierten spezifischen Mengen nichts.

Durch den Transport der Platinen aus Bild 5-11 an die Fertigung der Abdeckung wird der erste Trennprozess eingespart (vgl. Bild 5-12).



**Bild 5-12:** Das produktentwicklungsferne Transformationssystem aus Verfahren zur Bearbeitung der Platine zu der Abdeckung der alternativen Verwendung

Das führt nicht nur zur Einsparung eines Prozessschrittes des Transformationssystems zur Fertigung der Abdeckung sondern auch zu der Verringerung des erzeugten Neuschrottes um 92 % im Vergleich zu Tabelle 5-2 (vgl. Tabelle 5-9).

**Tabelle 5-9:** Antizipierte spezifische Flüsse an Energie und Material je kg Abdeckung des Referenzprozesses

Material i	Spez. Menge	Einheit	Quelle/Vereinfachungen/Verkürzungen
Elektrizität	$1,38 \times 10^{-6}$	TJ/kg	Annahme einer Pressenstraße mit zwei Servopressen nach Birkert et al. 2013, S. 451f. in Joule
Neuschrott	0,05	kg/kg	Fn. 696 und 697
Platine	1.05	kg/kg	Fn. 696
Abdeckung	1	kg	

Mit den Informationen aus Tabelle 5-1 bis Tabelle 5-9 ist es der Produktentwicklung in der Synthese durch die Multiplikation der spezifischen Mengen mit der Rahmenmasse als globale Variable mit den Charakterisierungsfaktoren möglich, die Nachhaltigkeitsindikatorwerte zu individualisieren. Die noch fehlenden Nachhaltigkeitscharakterisierungsfaktoren nach Formeln (15) bis (21) werden während der Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte im nächsten Schritt individualisiert.

### 5.4.3 Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte

Die Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte setzt sich aus zwei Prozessschritten zusammen. Ausgehend von den antizipierten Transformationssystemen, modelliert über die spezifischen Material- bzw. Energieflüsse und die jeweiligen Prozesse, Verfahren oder Operatoren aus Kapitel 5.4.2, werden zunächst die Charakterisierungsfaktoren individualisiert. Sie sind konsistent zu den modellierten Transformationssystemen bezüglich der Annahmen und der Systemgrenze, repräsentiert durch die Ein- und Ausgangsflüsse. Anschließend werden die antizipierten spezifischen Flüsse über die globale Variable und die Charakterisierungsfaktoren entsprechend Formel (14) für

die ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Sphäre individualisiert. Diese Schritte erfolgen sowohl für die Referenz als auch für die alternative Verwendung.

Die Charakterisierungsfaktoren der Nachhaltigkeitsindikatorwerte für die Ökosphäre sind durch die Material-Intensität der MIPS nach Formel (15) bereits vorhanden (vgl. Tabelle 5-10).

**Tabelle 5-10: Die ökologischen Charakterisierungsfaktoren der in Abschnitt 5.4.2 antizipierten Transformationssysteme**

Material i	$MIt_{i,k}$				Einheit	Quelle <sup>765</sup> /Anmerkung
	abiot.	biot.	Wasser	Luft		
Branntkalk	3,12	0	12,76	0,10	kg/kg	
Eisenerz	3,41	0	6,62	1,03	kg/kg	Ritthoff et al. 2002, S. 48
Elektrizität	$875 \times 10^3$	$11 \times 10^3$	$16 \times 10^6$	$143 \times 10^3$	kg/TJ	
Sauerstoff	2,58	0	137,02	1,7	kg/kg	
Schweröl	$32 \times 10^3$	0	$228 \times 10^3$	$76 \times 10^3$	kg/TJ	Diesel <sup>766</sup> mit Verbrennung, umgerechnet in Joule
Steinkohle	$83 \times 10^3$	0	$358 \times 10^3$	$90 \times 10^3$	kg/TJ	mit Verbrennung
Wasser	0,01	0	1,3	0	kg/kg	
Zement	2,2	0	21,31	0,25	kg/kg	

Die Charakterisierungsfaktoren der Flüsse der Nachhaltigkeitsindikatorwerte zur Ökono- und Soziosphäre des produktentwicklungsnahen Transformationssystemes der *Pressenstraße* entsprechend Formeln (16) bis (21) sind der Produktentwicklung i. d. R. bekannt. Sie ergeben sich für die gesellschaftlichen Charakterisierungsfaktoren aus den verfügbaren Informationen der Personaleinsatzplanung (vgl. Abschnitt 4.3) und für die ökonomischen Charakterisierungsfaktoren aus der Finanzwirtschaft (vgl. Kapitel 3.2.2.1). Tabelle 5-11 fasst die für die Betrachtung der ökonomischen Indikatorwerte der *Pressenstraße* benötigten ökonomischen Charakterisierungsfaktoren zusammen.

<sup>765</sup> Bis auf den Fluss an Eisenerz sind sämtliche Materialintensitäten beim Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2014, S. 1ff. zu finden.

<sup>766</sup> Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2014, S. 4 stellt keine Informationen bezüglich der Bereitstellung von Schweröl zur Verfügung. Hier wird stattdessen auf Diesel zurückgegriffen, da es in der Rektifikationskolonne nach dem Schweröl kondensiert.

Tabelle 5-11: Ökonomische Charakterisierungsfaktoren des produktentwicklungsnahen Transformationssystems *Pressenstraße*<sup>767</sup>

Ökonomische Charakterisierungsfaktoren		Einheit	Quelle/Anmerkung
$bk_{\text{Ferz,oSp}}$	0,431	€/kg	Kehrwert der Arbeitsproduktivität nach Tabelle A-2 für sechs Pressen multipliziert mit den Beschäftigungskosten von 69394,29 € <sup>768</sup>
$ek_{\text{Ferz,oSp}}$	234	€/TJ	eurostat 2015, in Joule umgerechnet
$mk_{\text{Ferz,oSp}}$	0,73	€/kg	Abschnitt A.3.1
$rk_{a,oSp}$	0,14	€/kg	Quotient aus Kostenanteil <i>Rest</i> von 11,10 % und <i>Material</i> von 0,58 % für <i>Wz 29.20 Herstellung von Karosserien, Aufbauten und Anhängern</i> nach Statistisches Bundesamt 2015f, S. 305 multipliziert mit $mk_{\text{Ferz,oSp}}$
$sp_{\text{Ns,oSp}}$	0,26	€/kg	Tabelle A-1
$sp_{a,oSp}$	33,92	€/kg	Listenpreis abzüglich der Handelsspanne über das Gewicht des Türrahmens spezifiziert nach Abschnitt A.3.1

Entsprechend Abschnitt 4.5 wird auf Operatorebene der Charakterisierungsfaktor der spezifischen restlichen Kosten aus Formel (19) durch die Finanzwirtschaft des produktentwicklungsnahen Unternehmens bereitgestellt.

Tabelle 5-12 fasst die für die Betrachtung der gesellschaftlichen Indikatorwerte des produktentwicklungsnahen Transformationssystems benötigten Charakterisierungsfaktoren zusammen.

Tabelle 5-12: Gesellschaftliche Charakterisierungsfaktoren des produktentwicklungsnahen Transformationssystems *Pressenstraße*

gesellschaftliche Charakterisierungsfaktoren		Einheit	Quelle/Anmerkung
$b_{\text{Ferz,oSp}}$	$6,210 \times 10^{-6}$	1/kg	Kehrwert der Arbeitsproduktivität nach Tabelle A-3
$v_{\text{Ferz,oSp}}$	$3,697 \times 10^{-3}$	Tag/kg	Kehrwert der Arbeitsproduktivität nach Tabelle A-3 multipliziert mit dem Verhältnis aus dem Bruttojahresverdienst <sup>769</sup> und den Lebensunterhaltskosten nach Abschnitt 4.3.1.3

Die Charakterisierungsfaktoren aus Tabelle 5-11 und Tabelle 5-12 haben sowohl für die Referenz nach Bild 5-11 als auch die alternative Prozesskette nach Bild 5-6 Gültigkeit.

<sup>767</sup> Flacherzeugnis – Ferz; Neuschrott – Ns

<sup>768</sup> Nach Statistisches Bundesamt 2015g, S. 4 beträgt der durchschnittliche Bruttoverdienst im produzierenden Gewerbe 4048 € pro Monat, angenommen wird ein Verhältnis von Bruttolohn zu Beschäftigungskosten von 70 %.

<sup>769</sup> a. a. O. Fn. 768

Für das produktentwicklungsferne Transformationssystem der Fertigung der Abdeckung nach Bild 5-7 ändern sich die ökologischen und gesellschaftlichen Charakterisierungsfaktoren von der Referenz nach Bild 5-7 hin zur alternativen Prozesskette nach Bild 5-12. Tabelle 5-13 fasst die ökonomischen Charakterisierungsfaktoren der Referenz zur Fertigung der Abdeckung nach Bild 5-7 zusammen. Nach Abschnitt 4.5 ist ein Antizipieren der spezifischen restlichen Kosten aus Formel (19) auf der Verfahrensebene nicht zweckmäßig.<sup>770</sup>

**Tabelle 5-13: Ökonomische Charakterisierungsfaktoren des Referenzprozesses *Fertigung ab***

Ökonomische Charakterisierungsfaktoren		Einheit	Quelle/Anmerkung
$bk_{\text{Ferz,vTz}}$	0,988	€/kg	Mittelwert der Kehrwerte der Arbeitsproduktivitäten nach Tabelle A-2 multipliziert mit den Beschäftigungskosten von 69394,29 € <sup>771</sup>
$ek_{\text{Ferz,vTz}}$	234	€/TJ	Tabelle 5-11
$mk_{\text{Ferz,vTz}}$	0,73	€/kg	
$sp_{\text{Ns,vSs'}}$	0,26	€/kg	
$sp_{\text{ab,vSs'}}$	25	€/kg	Fn. 697

Tabelle 5-14 fasst die gesellschaftlichen Charakterisierungsfaktoren des Referenzprozesses der Fertigung der Abdeckung nach Bild 5-7 zusammen.

**Tabelle 5-14: Gesellschaftliche Charakterisierungsfaktoren des Referenzprozesses *Fertigung ab***

gesellschaftliche Charakterisierungsfaktoren		Einheit	Quelle/Anmerkung
$b_{\text{Ferz,Fertigung ab}_r}$	$1,504 \times 10^{-6}$	1/kg	Mittelwert der Kehrwerte der Arbeitsproduktivitäten nach Tabelle A-2 für drei Pressen
$V_{\text{Ferz,Fertigung ab}_r}$	$8,953 \times 10^{-3}$	Tag/kg	Mittelwert der Kehrwerte der Arbeitsproduktivitäten nach Tabelle A-2 multipliziert mit dem Verhältnis aus dem Bruttojahresverdienst <sup>772</sup> und den Lebensunterhaltskosten nach Abschnitt 4.3.1.3

<sup>770</sup> Gemäß Abschnitt 4.5 wird für das Antizipieren der Fertigung der Abdeckung (Fertigung ab) über mehrere Operanden nach Tabelle A-2 aggregiert.

<sup>771</sup> a. a. O. Fn. 768

<sup>772</sup> a. a. O. Fn. 768

Die Substitution des Flacherzeugnisses durch die Platinen aus der *Pressenstraße* führt zu einer Einsparung des ersten Trennprozesses zur Fertigung der Platine. Tabelle 5-15 fasst die ökonomischen Charakterisierungsfaktoren der alternativen Fertigung der Abdeckung nach Bild 5-12 zusammen.

Tabelle 5-15: Ökonomische Charakterisierungsfaktoren der alternativen *Fertigung ab*

Ökonomische Charakterisierungsfaktoren	Einheit	Quelle/Anmerkung
$bk_{\text{Ferz},vSs'}$	1,482 €/kg	Mittelwert der Kehrwerte der Arbeitsproduktivitäten nach Tabelle A-2 für zwei Pressen multipliziert mit den Beschäftigungskosten <sup>773</sup>
$ek_{\text{Ferz},vSs'}$	234 €/TJ	Tabelle 5-11
$mk_{\text{Platine},vSs'}$	0,73 €/kg	
$sp_{\text{Ns},vSs'}$	0,26 €/kg	
$sp_{\text{ab},vSs'}$	25 €/kg	Tabelle 5-13

Die gesellschaftlichen Charakterisierungsfaktoren ändern sich im Vergleich zur Referenz nicht, da die Produktivität eines Mitarbeitenden nicht von der Anzahl der Prozessschritte bzw. der Operanden abhängig ist. Im Vergleich zur Fertigung der Abdeckung aus fabrikneuem Flacherzeugnis werden zur Fertigung der Abdeckplatte aus Fensterausschnitten weniger Pressen und damit weniger personengebundene Leistungen bzw. Anwendende benötigt.

Die Individualisierung der Charakterisierungsfaktoren der Ökono- und Soziosphäre der restlichen produktentwicklungsfernen Transformationssysteme erfolgt ebenfalls für Formeln (16) bis (21). Sie unterscheiden sich zwischen der antizipierten Referenz und der alternativen Verwendung nicht. Sie sind der Produktentwicklung i. d. R. nicht bekannt (vgl. Abschnitt 4.2). Für die Synthese der ökonomischen und gesellschaftlichen Charakterisierungsfaktoren der antizipierten Transformationssysteme wird in diesem Beispiel auf in Deutschland erhobene statistische Informationen unterschiedlicher Wirtschaftszweige (Wz) nach STATISTISCHES BUNDESAMT zurückgegriffen. Wirtschaftszweige werden als wirtschaftliche Tätigkeiten verstanden,<sup>774</sup> die anhand von Merkmalen der transformierten Materialien klassifiziert<sup>775</sup> und über Ähnlichkeiten der Transformationsprozesse aggregiert sind<sup>776</sup>. Durch die Verkürzung um Organisationseinheiten, Organisationsformen und Standorte und der verfahrensunabhängigen bzw. von Operanden unabhängigen Betrachtungen von Transformationssystemen ist die Modellierung der Prozess- bzw. Verfahrensebene über Wirtschaftszweige sowohl mit dem Partialmodell der Technosphäre nach Abschnitt 3.2 als auch mit dem Verständnis des Antizipierens von Transformationssystemen nach Abschnitt 4.2 konsistent. Die Wirtschaftszweige werden von Abschnitten, über Gruppen, Abteilungen und Klassen nach

<sup>773</sup> a. a. O. Fn. 768

<sup>774</sup> Statistisches Bundesamt 2008, S. 9

<sup>775</sup> Statistisches Bundesamt 2008, S. 20

<sup>776</sup> Statistisches Bundesamt 2008, S. 19

Unterklassen konkretisiert.<sup>777</sup> Weitere Vorteile sind die Dauerhaftigkeit und Aktualität der Daten. Die Klassifizierung auf Grundlage ähnlicher Transformationssysteme überdecken sich z. T. nicht mit den Teilprozessen des Produktlebenslaufes nach Bild 3-2. Hier wird die in Abschnitt 2.1.2 bereits erwähnte inkonsistente Systematisierung der Teilprozesse des Produktlebenslaufes deutlich. Z. B. aggregiert die Gruppe Wz 24.1 *Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen*<sup>778</sup> Teilprozesse der Verarbeitung wie die Herstellung von Schmelzen und die Bearbeitung und das Urformen eines Stahlwerkstoffes zu Brammen mit anschließendem Umformen zu Flacherzeugnissen.<sup>779</sup> Hier liegt eine standortspezifische Betrachtungsgrenze vor, obwohl sie durch die Methode der Klassifizierungen von Wirtschaftszweigen nach STATISTISCHES BUNDESAMT ausgeschlossen wird. Tabelle 5-16 ordnet den Transformationssystemen mit entsprechenden Material- bzw. Energieflüssen am Ausgang die Wirtschaftszweige zu.

Tabelle 5-16: Zuordnung der Transformationssysteme zu den Wirtschaftszweigen

Transformationssystem	Material i Ausgang	Abstraktions-ebene	Bild	Wirtschaftszweig	Quelle
Reduzieren	Eisen Schlacke	v	Bild 5-8	Wz 24.1 <sup>780</sup>	Statistisches Bundesamt 2008, S. 253
Frischen	Stahl Schlacke	v			
Stranggießen	Bramme Neuschrott	v	Bild 5-10	Wz 24.32 <sup>781</sup>	Statistisches Bundesamt 2008, S. 255
Flächenlängswalzen	Flacherzeugnis Neuschrott	v			
Herstellung von Zement	Zement	v	vgl. Fn. 742	Wz 23.51	Statistisches Bundesamt 2008, S. 249
Wasserversorgung	Wasser	p		Wz 36.0	Statistisches Bundesamt 2008, S. 337
Elektrizitätsversorgung	Elektrizität	p		Wz 35.1	Statistisches Bundesamt 2008, S. 334
Herstellung von Kalk	Branntkalk	p		Wz 23.52	Statistisches Bundesamt 2008, S. 249
Herstellung von Industriegasen	Sauerstoff	p		Wz 20.11	Statistisches Bundesamt 2008, S. 230

<sup>777</sup> Statistisches Bundesamt 2008, S. 18

<sup>778</sup> Statistisches Bundesamt 2008, S. 253

<sup>779</sup> Statistisches Bundesamt 2008, S. 253

<sup>780</sup> Obwohl die Transformationssysteme Reduzieren und Frischen auf Prozess- und Stranggießen auf Verfahrensebene antizipierbar sind, werden aufgrund der fehlenden Konkretisierung der Gruppe Wz 24.1 zu entsprechenden Klassen bzw. Unterklassen die Informationen der Gruppe herangezogen.

<sup>781</sup> Bedingt durch die in diesem Abschnitt diskutierte Inkonsistenz der Klassifikation der Wirtschaftszweige ist die Zuordnung des Flacherzeugnisses sowohl zu der Gruppe Wz 24.1 als auch zu der Klasse Wz 24.32 möglich. Auch auf die Gefahr einer Mehrfachberücksichtigung der Daten wird hier die Wz 24.32 zur Individualisierung der Charakterisierungsfaktoren verwendet.

Die Wahl der Datenbasis für die Individualisierung der Charakterisierungsfaktoren über Gruppen, Abteilungen, Klassen oder Unterklassen wird über die Konsistenz der beschriebenen Wirtschaftszweige und den antizipierten Flüsse an Material und Energie der produktentwicklungsfernen Transformationssysteme getroffen. Beispielsweise kann in dem Fall, dass die Fertigung des Türrahmens in einem produktentwicklungsfernen Transformationssystem stattfindet, dieses Transformationssystem über die Klasse Wz 29.20 *Herstellung von Karosserien, Aufbauten und Anhängern* individualisiert werden.<sup>782</sup>

Die Transformationssysteme der Wasser- und Elektrizitätsversorgung sowie der Herstellung von Kalk und Industriegasen werden aufgrund der Randbedingung einer unmittelbaren Verbindung zwischen den Transformationssystemen des Produktlebenslaufes über Materialflüsse aus Abschnitt 5.4.1 auf der Abstraktionsebene der Prozesse nach Abschnitt 4.5 individualisiert.

Die individualisierten ökonomischen Charakterisierungsfaktoren der spezifischen Materialkosten für Formel (16) und den spezifischen Mengenpreis für Formel (12) für die Material- und Energieflüsse der produktentwicklungsfernen antizipierten Transformationssysteme sind in Tabelle 5-17 zu finden. Da keine Transportprozesse berücksichtigt werden, entsprechen die Werte auf Seiten des Beschaffungsmarktes denselben wie auf Seiten des Absatzmarktes.

**Tabelle 5-17: Individualisierte ökonomische Charakterisierungsfaktoren der Material- und Energieflüsse**

Fluss	$mk_i/sp_i/ek_i$	Einheit	Quelle/Anmerkung
Bramme	0,488	€/kg	Statistisches Bundesamt 2014, S. 161
Branntkalk	0,0085	€/kg	Statistisches Bundesamt 2014, S. 155
Eisen	0,309	€/kg	Statistisches Bundesamt 2014, S. 161
Eisenerz	0,067	€/kg	InfoMine 2015c, Mittelwert zwischen höchstem und niedrigstem Preis
Kalk	0,0367	€/kg	Statistisches Bundesamt 2014, S. 155, für die Zementherstellung
Sauerstoff	0,043	€/kg	Statistisches Bundesamt 2014, S. 96
Schlacke	0,0131	€/kg	Statistisches Bundesamt 2014, S. 155
Schweröl	$1,217 \times 10^{-20}$	€/TJ	InfoMine 2015b, Mittelwert zwischen höchstem und niedrigstem Preis
Stahl	0,374	€/kg	Annahme
Steinkohle	$1,91 \times 10^{-18}$	€/TJ	InfoMine 2015a, Mittelwert zwischen höchstem und niedrigstem Preis
Wasser	$2,95 \times 10^{-5}$	€/kg	Mittelwert nach WasEG § 2 Abs. (2)
Zement	0,055	€/kg	Statistisches Bundesamt 2014, S. 155

<sup>782</sup> Statistisches Bundesamt 2008, S. 310, in dem Fall wird die Klasse weiter zu der Unterklasse Wz 29.20.0 konkretisiert. Da keine weitere Unterteilung der Klasse erfolgt, entspricht die Unterklasse der Klasse.

Das Ergebnis der Individualisierung der gesellschaftlichen Charakterisierungsfaktoren ist in Tabelle 5-18 zu finden.

Tabelle 5-18: Individualisierte gesellschaftliche Charakterisierungsfaktoren

gesellschaftliche Charakterisierungsfaktoren		Einheit	Quelle/Anmerkung
$b_{\text{Brammel, vSg}}$	$5,873 \times 10^{-7}$	1/kg	Kehrwerte der Arbeitsproduktivitäten nach Tabelle A-2
$b_{\text{Eisen, vRe}}$	$5,873 \times 10^{-7}$	1/kg	
$b_{\text{Elektrizität, pEv}}$	$8,682 \times 10^{-2}$	1/Tj	
$b_{\text{Ferz, vFlw}}$	$9,150 \times 10^{-7}$	1/kg	
$b_{\text{Kalk, pHK}}$	$8,817 \times 10^{-9}$	1/kg	
$b_{\text{Sauerstoff, pHI}}$	$1,296 \times 10^{-7}$	1/kg	
$b_{\text{Stahl, vFr}}$	$5,873 \times 10^{-7}$	1/kg	
$b_{\text{Wasser, pWv}}$	$8,020 \times 10^{-9}$	1/kg	
$b_{\text{Zement, vTr}}$	$1,832 \times 10^{-7}$	1/kg	
$v_{\text{Bramme, vSg}}$	$3,503 \times 10^{-4}$	Tag/kg	Kehrwerte der Arbeitsproduktivitäten nach Tabelle A-2 multipliziert mit dem Verhältnis aus dem Bruttojahresverdienst <sup>783</sup> und den Lebensunterhaltskosten nach Abschnitt 4.3.1.3
$v_{\text{Eisen, vRe}}$	$3,503 \times 10^{-4}$	Tag/kg	
$v_{\text{Elektrizität, pEv}}$	$5,167 \times 10^1$	Tag/Tj	
$v_{\text{Ferz, vFlw}}$	$5,447 \times 10^{-4}$	Tag/kg	
$v_{\text{Kalk, pHK}}$	$5,249 \times 10^{-6}$	Tag/kg	
$v_{\text{Sauerstoff, pHI}}$	$7,713 \times 10^{-5}$	Tag/kg	
$v_{\text{Stahl, vFr}}$	$3,503 \times 10^{-4}$	Tag/kg	
$v_{\text{Wasser, pWv}}$	$4,774 \times 10^{-6}$	Tag/kg	
$v_{\text{Zement, vTr}}$	$1,089 \times 10^{-4}$	Tag/kg	

Mit den bekannten Charakterisierungsfaktoren werden die Nachhaltigkeitsindikatorwerte entsprechend Abschnitt 4.3 berechnet. Das Ergebnis der Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte wird entsprechend Abschnitt 5.4.1 anhand der zwei Betrachtungsschwerpunkte:

- Kostensenkungspotenzial durch die alternative Verwendung für das produktentwicklungsnahe Unternehmen
- Sämtliche Nachhaltigkeitsindikatorwerte für die Marketingabteilung

aufgezeigt. Tabelle A-3 fasst die berechneten Indikatorwerte für die Referenz und Tabelle A-4 für die alternative Verwendung im Anhang zusammen.

#### 5.4.3.1 Kostensenkungspotenzial für die produktentwicklungsnahe Ökosphäre

Die Betrachtung der Referenz der Fertigung des Rahmens als prozessuale Einheit zeigt, dass der Materialwert über die Fertigung hinweg durch die Herstellung von Neuschrott um 5,12€ je gefertigten Türrahmen abnimmt (vgl. Abschnitt A.3.1). Durch die alternative Verwendung wird der Fensterausschnitt an die Fertigung der Abdeckung

<sup>783</sup> a. a. O. Fn. 768

geleitet. Der Fertigende der Abdeckung erhöht den Gewinn um 0,64 € je Abdeckung (vgl. Abschnitt A.3.3).<sup>784</sup>

Unter der Annahme, dass die Platine den gleichen Preis erzielt wie das Flacherzeugnis bedeutet eine alternative Verwendung des Fensterausschnittes in der Fertigung der Abdeckung eine Erhöhung des Gewinnes bzw. der Differenz aus monetärem Aus- und Eingang um 0,99 € für das produktentwicklungsnahe Unternehmen (vgl. Abschnitt A.3.3).<sup>785</sup> Bezogen auf die von der Kostenplanung vorgegebenen Einsparung von 4 € je Tür nach Abschnitt 5.1 werden durch die Maßnahme der alternativen Verwendung 25 % erreicht. Die verbleibenden 3 € je Tür können durch die alternative Verwendung anderer Verschnitte des Rahmens, der Außenhaut oder des Aufprallträgers erreicht werden. Die Berechnungen laufen analog ab. Ergänzende mögliche Maßnahmen sind die Einsparung von Fertigungskosten der Bauteile oder von Montagekosten. Dieses Ergebnis kann durch die Anpassung der prozessualen Einheit auf die Gesamtproduktion des Vorgängermodelles hochgerechnet werden. Das bedeutet bei einem Verhältnis von 50 % zwischen verkauften Drei- und Fünftürern und 3,27 Millionen verkauften Fahrzeugen<sup>786</sup> eine Erhöhung des Gewinnes um 9,69 Mio €.

#### **5.4.3.2 Nachhaltigkeitsindikatorwerte für das Marketing**

Dem Marketing werden die Daten der Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte entsprechend Tabelle A-3 für die Referenz und entsprechend Tabelle A-4 für die alternative Verwendung des Fensterausschnittes zur Verfügung gestellt. Eine Auswertung der ökonomischen Indikatorwerte über sämtliche bilanzierte Transformationssysteme ergibt beispielsweise einen Gewinnrückgang um 2 % im Vergleich zwischen der Referenz und der alternativen Verwendung. Die alternative Verwendung hat insbesondere auf das Transformationssystem des Frischens eine negative Wirkung auf die betriebswirtschaftliche Ökonosphäre. Ökologisch betrachtet, werden durch die alternative Verwendung im Vergleich zur Referenz mehr als 19 % weniger Material-Input verursacht. Die bilanzierten Prozesse benötigen 18,5 % weniger personengebundene Leistungen in Form von Arbeitskraft. Das führt in absoluten Zahlen<sup>787</sup> zu einer Verringerung der Beschäftigungszahlen um 6709 und damit um eine geringere Versorgung einer durchschnittlichen Familie um 11.307 Jahre.

---

<sup>784</sup> Eine Aussage über die Veränderung der Liquidität als Nachhaltigkeitsindikator in Abhängigkeit von Umsatz und Kosten als Nachhaltigkeitsindikatorwerte ist vom Individualmodell der Ökonosphäre der Unternehmen abhängig. Eine Erhöhung des Gewinnes ist keine hinreichende Bedingung für die Erhöhung der Liquidität (vgl. Abschnitt 2.2.1.2 und Abschnitt 4.4).

<sup>785</sup> siehe Fn. 784

<sup>786</sup> Verkaufszahlen des Referenzmodelles nach Fn. 662 nach Statistisches Bundesamt 2015a

<sup>787</sup> a. a. O. Fn. 786

## 6 Evaluierung

In Kapitel 5 sind die Grundlagen einer *Anwendungsevaluierung* („*application evaluation*“)<sup>788</sup> bereitgestellt worden. In diesem Kapitel wird auf Grundlage der DRM eine Anwendungs- und eine Erfolgsevaluierung entsprechend Abschnitt 1.3 durchgeführt.

### 6.1 Die Anwendungsevaluierung

Die Anwendungsevaluierung hat zur Aufgabe, den Mehrwert der erarbeiteten Unterstützung zu identifizieren.<sup>789</sup> Der Fokus liegt auf der Gebrauchstauglich- und Anwendbarkeit („*usability and applicability*“)<sup>790</sup> der erarbeiteten Unterstützung. Die Einzelmethoden zur Synthese der ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Indikatorwerte des zu entwickelnden Produktes entsprechen dem Stand der Technik. Daher wird auf die Evaluierung der Primärquellen verwiesen.<sup>791</sup> Ein Vergleich zwischen der erarbeiteten Methodik und vorhandenen Methodiken zur Nachhaltigkeitsbilanzierung ist aufgrund der im Stand der Technik fehlenden Methodiken nicht durchführbar. Daher wird die Anwendungsevaluierung durch die qualitative Beantwortung folgender Fragen (vgl. Abschnitt 1.3) anhand der beispielhaft durchgeführten Anwendung und des Erfüllens der Anforderungen nach Abschnitt 2.3 durchgeführt:<sup>792</sup>

- Ist eine Anwendung der erarbeiteten Unterstützung möglich?
- Richtet sich die erarbeitete Methodik tatsächlich an die Nachhaltigkeitsindikatorwerte durch die ermittelten Aktionsparameter der Produktentwicklung?
- Entspricht die Wirkung der Aktionsparameter auf die Nachhaltigkeitsindikatorwerte der erwarteten Wirkung?

#### **Ist eine Anwendung der erarbeiteten Unterstützung möglich?**

Die beispielhafte Anwendung der erarbeiteten Methodik in Kapitel 5 zeigt die Möglichkeit des Gebrauches der erarbeiteten Unterstützung. Über das Partialmodell der Entwicklung nachhaltiger Produkte nach Bild 3-1 ist eine logische und semantische Verbindung zwischen dem Produktlebenslauf mit den anthropogenen Transformationssystemen und den Dimensionen der Nachhaltigkeit über die Sphären der Nachhaltigkeit als Subsysteme auf Basis der GPPe geschaffen. Das erarbeitete Partialmodell des Produktlebenslaufes ermöglicht ein zu Normen und Richtlinien konsistentes Antizipieren der Transformationssysteme des Lebenslaufes des zu entwickelnden Produktes. Die Einordnung des virtuellen Produktlebenslaufes zu der restlichen Technosphäre er-

<sup>788</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 37ff.

<sup>789</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 37ff.

<sup>790</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 41

<sup>791</sup> Die Methode zur Synthese der ökologischen Nachhaltigkeitsindikatorwerte entspricht der Ermittlung der Material-Intensität des MIPS (vgl. Abschnitt 3.2.1). Die Methode zur Synthese der ökonomischen Nachhaltigkeitsindikatorwerte entspricht der Ermittlung der Einzelkosten der differenzierenden Zuschlagskalkulation nach Abschnitt 3.2.2.1.1. Die Synthese der gesellschaftlichen Nachhaltigkeitsindikatorwerte entspricht der Produktivitätsermittlung nach REFA bzw. der Anwendung der Methode zur Ermittlung der Anzahl von Beschäftigten in der Recycling- und Entsorgungsbranche nach Becker et al. 2009, S. 27 (vgl. Abschnitt 3.2.3).

<sup>792</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 184

weitert den Verantwortungsbereich der Produktentwicklung und sensibilisiert hinsichtlich der Wirkung der Entscheidungen während der Produktentwicklung auf Lebensläufe anderer mit dem Lebenslauf des zu entwickelnden Produktes über Material- und Energieflüsse in Verbindung stehender Anspruchsgruppen. Die Abstraktionsebenen des Prozessmodelles tragen sowohl dem Dilemma der Produktentwicklung als auch dem Problem der varianten Antizipierbarkeit zwischen produktentwicklungsnahen und -fernen Transformationssystemen des Produktlebenslaufes Rechnung. Die Struktur und Logik des Partialmodelles der Nachhaltigkeitsindikatorwerte nach Formel (14) erlaubt konsistent zu der Ökobilanz eine Synthese bzw. Individualisierung derselben durch die für die einzelnen Sphären weiter spezialisierten Partialmodelle nach den Formeln (15) bis (21).

### **Richtet sich die erarbeitete Methodik tatsächlich an die Nachhaltigkeitsindikatorwerte durch die ermittelten Aktionsparameter der Produktentwicklung?**

Als Aktionsparameter sind die Material- und Energieflüsse innerhalb der Technosphäre durch die Ökobilanz vorgegeben. Auf Grundlage des materialflussbasierten Partialmodelles der Technosphäre nach Bild 3-2 ist ein über den eigentlichen Lebenslauf des zu entwickelnden Produktes hinaus erweitertes Antizipieren und eine anschließende Möglichkeit der Analyse der Wirkung von Entscheidungen während der Produktentwicklung gewährleistet. Durch die direkte mathematische Abhängigkeit der Nachhaltigkeitsindikatorwerte von dem Material- bzw. Energiefluss und dem jeweiligen Charakterisierungsfaktor nach Formel (14) ist eine Wirkung der Änderung der Aktionsparameter über Nachhaltigkeitsindikatorwerte auf die Nachhaltigkeitssphären synthetisierbar. Abschnitt 5.4.3 zeigt, dass die Änderung des Flusses des Fensterausschnittes von der Verarbeitung zu einer Bearbeitung zu einer Abdeckung Wirkung auf die Nachhaltigkeit sämtlicher über die Materialflüsse des Produktlebenslaufes in Verbindung stehender Transformationssysteme der Technosphäre hat. Es sind nicht nur Wirkungen innerhalb des Produktlebenslaufes sondern auch anderer Produktlebensläufe wie der Herstellung von Zement, der Wasser- und Elektrizitätsversorgung, der Herstellung von Kalk und Industriegasen synthetisierbar.

### **Entspricht die Wirkung der Aktionsparameter auf die Nachhaltigkeitsindikatorwerte der erwarteten Wirkung?**

Das Beispiel der Einführung der Pfandpflicht für Einwegverpackungen von Getränken in der Bundesrepublik Deutschland aus Abschnitt 3.2 hat den erweiterten Einfluss von Entscheidungsträgern auf die Sphären der Nachhaltigkeit beschrieben. Das beabsichtigte Beeinflussen eines Produktlebenslaufes ruft eine Wirkung auf sämtliche mit dem Produktlebenslauf über Materialflüsse in Verbindung stehende Transformationssysteme der Technosphäre hervor. Diese Wirkung ist durch die beispielhafte Durchführung der Nachhaltigkeitsbilanzierung am Beispiel der alternativen Verwendung über die Nachhaltigkeitsindikatorwerte synthetisiert worden. Ökologisch führt die alternative Verwendung erwartungsgemäß zu einem nachhaltigeren Zustand. Ökonomisch zeigt

die beispielhafte Anwendung die in Kapitel 3.2.2 aufgezeigten Abhängigkeiten unterschiedlicher Anspruchsgruppen innerhalb der Technosphäre. Die alternative Verwendung führt sowohl bei dem produktentwicklungsnahen Unternehmen als auch der Fertigung der Abdeckung zu einem ökonomisch nachhaltigeren Zustand. Die geringere Nachfrage der Fertigung der Abdeckung nach fabrikneuem Flacherzeugnis führt gleichzeitig zu einem ökonomisch weniger nachhaltigen Zustand der produktentwicklungsfernen Ver- und Bearbeitenden. Gleichzeitig sind negative ökonomische Wirkungen auf Versorgende und Verwertende von Koppelprodukten erwartungsgemäß synthetisiert worden.

## 6.2 Die Erfolgsevaluierung

Die Erfolgsevaluierung hat zur Aufgabe, den erreichten Zustand im Vergleich zum definierten Soll-Zustand zu beurteilen.<sup>793</sup> Der Fokus liegt auf der Brauchbarkeit („*usefulness*“)<sup>794</sup> der erarbeiteten Unterstützung.<sup>795</sup> Folgende Fragen werden bezüglich des Erreichens eines konsistenten, durchgehenden und operationalisierbaren Daten-, Modell- und Methodenwissens zur Nachhaltigkeitsbilanzierung beantwortet:<sup>796</sup>

- Hat die Anwendung der erarbeiteten Methodik zur Nachhaltigkeitsbilanzierung von zu entwickelnden Produkten den gewünschten Soll-Zustand erreicht?
- Sind sämtliche Anforderungen an die Methodik einer Nachhaltigkeitsbilanzierung für zu entwickelnde Produkte erfüllt?
- Lässt die beispielhafte Durchführung der erarbeiteten Methodik einen Einsatz in der Praxis<sup>797</sup> vermuten?

### **Hat die Anwendung der erarbeiteten Methodik zur Nachhaltigkeitsbilanzierung von zu entwickelnden Produkten den gewünschten Soll-Zustand erreicht?**

In den Kapiteln 1 und 2 ist ein Defizit bezüglich vorhandener Methodiken zur Entwicklung nachhaltiger Produkte herausgearbeitet worden. Die entwickelte Methodik erlaubt erstmals eine an die Gegebenheiten der Produktentwicklung angepasste Nachhaltigkeitsbilanzierung. Durch Kapitel 3 wird ein Partialmodell der Entwicklung nachhaltiger Produkte bereitgestellt, das die Möglichkeiten der Antizipier-, Beeinfluss- und Analysierbarkeit der Nachhaltigkeit systematisiert. Über die Nachhaltigkeitsindikatorwerte ist ein ökobilanzkonformer Zusammenhang zwischen der beeinfluss- und antizipierbaren Technosphäre und den analysierbaren Sphären der Nachhaltigkeit geschaffen worden. Durch die Abstraktionsebenen des Prozessmodelles ist die Analyse von Transformationssystemen trotz unterschiedlicher Informationsverfügbarkeit gewährleistet. Die beispielhafte Anwendung hat zudem gezeigt, dass trotz eines fiktiven Beispiels plausible Ergebnisse synthetisierbar sind (vgl. Abschnitt A.3).

<sup>793</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 37

<sup>794</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 41

<sup>795</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 185f.

<sup>796</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 185

<sup>797</sup> Blessing und Chakrabarti 2009, S. 26

### **Sind sämtliche Anforderungen an die Methodik einer Nachhaltigkeitsbilanzierung für zu entwickelnde Produkte erfüllt?**

Die erarbeitete Methodik ist bezüglich der Partialmodelle der Entwicklung nachhaltiger Produkte, der Partialmodelle der Nachhaltigkeitsindikatorwerte und des Vorgehen sowohl untereinander als auch hinsichtlich der Ökobilanzmethodik konsistent. Ebenso ist eine horizontale wie auch vertikale Durchgängigkeit durch die Individualisierung der Transformationssysteme auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen des Prozessmodelles gewährleistet. Inkonsistenzen herrschen bezüglich des Partialmodelles der Technosphäre und den in der Literatur verfügbaren Informationen zum Antizipieren von Transformationssystemen. Zum einen ist das Vorgehen eines auf mehreren Abstraktionsebenen modellierbaren Transformationssystemes zur Individualisierung ökologischer Wirkungen, ökonomischer Kennwerten oder gesellschaftlicher Indikatoren neuartig. Zum anderen sind vorhandene Datenbanken wie ProBas oder ÖKOBAUDAT zum Individualisieren von Material- und Energieflüssen antizipierter Transformationssysteme oder Strukturhebungen<sup>798</sup> nach STATISTISCHES BUNDESAMT zur Individualisierung von Charakterisierungsfaktoren mit dem erarbeiteten Partialmodell der Technosphäre nicht durchgehend konsistent.

Die Anforderungen der Operationalisierbarkeit sind durch die einheitlichen Partialmodelle der Nachhaltigkeitsindikatorwerte wie auch für Transformationssysteme unterschiedlicher Abstraktionsebenen erfüllt. Die Individualisierung der Transformationssysteme über spezifische Größen ermöglicht eine Wiederverwendung bereits implementierter Transformationssysteme.

### **Lässt die beispielhafte Durchführung der erarbeiteten Methodik einen Einsatz in der Praxis vermuten?**

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1.1 erwähnt, ist die Bilanzierung der ökologischen Nachhaltigkeit aufgrund der Datenerhebung aufwendig. Die erarbeitete Methodik verringert den erstmaligen Aufwand zum Implementieren der spezifischen Flüsse antizipierter Transformationssysteme mit der Individualisierung der Charakterisierungsfaktoren nicht. Ein bereits implementiertes Transformationssystem kann, wie bei anderen Unterstützungen auch, wiederverwendet werden. Die erarbeitete Unterstützung ermöglicht bei geringerem Aufwand im Vergleich zu der ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Bilanzierung über Einzelmethodiken eine äquivalente Informationsgenerierung. Während bei Einzelmethoden unterschiedliche und teilweise redundante Daten zur Individualisierung erhoben werden, individualisiert die erarbeitete Unterstützung, ausgehend von derselben Datenbasis, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Nachhaltigkeitsindikatorwerte. Durch das zur Ökobilanz konsistente Vorgehen und den Aufbau der Partialmodelle ist zudem eine Implementierung der öko-

---

<sup>798</sup> Beispielsweise zeigt Abschnitt 5.4.3, dass eine eindeutige Zuordnung von Flacherzeugnissen zu einem Wirtschaftszweig nicht möglich ist.

nomischen und gesellschaftlichen Charakterisierungsfaktoren in vorhandene Ökobilanzierungssoftware zur Erweiterung hinsichtlich einer „Nachhaltigkeitsbilanzierungssoftware“ möglich.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt der Produktentwicklung erstmals eine in Modellen und Vorgehen konsistente Methodik zur Bilanzierung der Nachhaltigkeit eines zu entwickelnden Produktes zur Verfügung. Der Stand der Forschung hat gezeigt, dass i. d. R. in der Wissenschaft ausschließlich formal auf den Nachhaltigkeitsgedanken eingegangen wird. Eine Berücksichtigung der integrativen ökonomischen, ökologischen wie auch gesellschaftlichen Nachhaltigkeit findet nicht statt. Erstmals ist eine in Modellen und dem Vorgehen konsistente Methodik, die auf dem Stand der Technik aus Umweltwissenschaft, Wirtschaftswissenschaft und Geisteswissenschaft aufbaut und die Konstruktionsforschung vorgegebenen Rahmenbedingungen berücksichtigt, erarbeitet und nach *Design Research Methodology* evaluiert worden. Auf Grundlage der in der Literatur verfügbaren und dem Stand der Technik entsprechender Methodiken wird eine allgemeingültige, anwendbare und in sich konsistente Methodik zur Unterstützung einer Entwicklung nachhaltiger Produkte durch eine Nachhaltigkeitsbilanzierung erarbeitet. Auf Grundlage eines zu Normen und Richtlinien konsistenten Partialmodelles der Technosphäre wird der Verantwortungsbereich der Produktentwicklung gänzlich erfasst und zu bestehenden Partialmodellen des Produktlebenslaufes erweitert. Analog zur *Ganzheitlichen Produkt- und Prozessentwicklung* werden während der Entwicklung nachhaltiger Produkte Transformationssysteme der Technosphäre antizipiert und durch die Entscheidungen über die Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes beeinflusst. Die Entscheidungen über die Eigenschaften erfolgen hinsichtlich der Erfüllung klassischer Anforderungen und der Wirkung auf die Dimensionen der Nachhaltigkeit, modelliert durch die Öko-, Ökono- und Soziosphäre als Subsysteme der Dimensionen. Zur Analyse der Wirkung der antizipierten Technosphäre auf die durch Subsysteme spezialisierte Nachhaltigkeitssphären wird für jede Sphäre ein Partialmodell zur Individualisierung der ökonomischen, ökologischen wie auch gesellschaftlichen Nachhaltigkeitsindikatorwerte bereitgestellt. Dies erfolgt in Konsistenz mit der Ökobilanz. Zur adäquaten Anwendung der erarbeiteten Methodik wird ein operationalisiertes EDV-Hilfsmittel zur Verfügung gestellt. Durch die Individualisierung von Transformationssystemen über spezifische Größen sind bereits implementierte Transformationssysteme wiederverwendbar.

Zum Erreichen des Zieles der Erarbeitung eines methodischen Ansatzes zur Entwicklung nachhaltiger Produkte sind weitere zentrale Ergebnisse dieser Arbeit vorausgesetzt. Dazu zählen von entwicklungsmethodischer Seite u. a. die logische Verknüpfung zwischen der Methode als Vorgehen zur Lösung von Problemen mit den für die Methode spezialisierten Partialmodellen, die Adaption der Terminologie der Nachhaltigkeitsforschung in den Kontext der Konstruktionsforschung und die Konkretisierung der durch das Dilemma der Produktentwicklung beschriebenen Abhängigkeit der Beeinflussbarkeit der Technosphäre durch den Konkretisierungsgrad des zu entwickelnden Produktes. Von Seiten der Nachhaltigkeitsforschung sind erstmals die Dimensionen der Nachhaltigkeit und ihre Abgrenzung untereinander konkretisiert und auf den Einflussbereich der Produktentwicklung spezialisiert worden. Ein zentrales Ergebnis ist

dabei die Trennung der anthropogenen Prozesse innerhalb der Technosphäre von den Prozessen innerhalb der Sphären der Nachhaltigkeit. Erst diese Abgrenzung ermöglicht die ökobilanzkonforme Bilanzierung der Wirkung von Prozessen auf die Nachhaltigkeit über Nachhaltigkeitsindikatorwerte.

Mit dieser Abgrenzung geht eine Betrachtung unterschiedlicher Anspruchsgruppen und Aggregationsebenen der Nachhaltigkeitssphären einher. Während bei der Bilanzierung der Umweltwirkung eine Umwelt beschrieben durch die unterschiedlichen Sphäre vorausgesetzt wird, werden für die Ökono- und Soziosphäre unterschiedliche Anspruchsgruppen und deren Aggregationen betrachtet. Für die Betrachtung der ökonomischen Nachhaltigkeit ist nicht nur die Betriebswirtschaft des produktentwicklungsnahe Unternehmens zu berücksichtigen. Die Entscheidungen der Produktentwicklung haben Einfluss auf sämtliche an dem Produktlebenslauf beteiligte Anspruchsgruppen. Was ökonomisch nachhaltig für das produktentwicklungsnahe Unternehmen ist, führt nicht zwangsläufig bei Zulieferern oder Kunden zu einem ökonomisch nachhaltigen Zustand.

Bezüglich der Sphären der gesellschaftlichen Dimension haben sich nach Recherchen und der Abgrenzung des Einflussbereiches der Produktentwicklung die personengebundenen Leistungen als ein Indikatorwert der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit und die davon abhängige Versorgung herausgestellt. Besonders aufgrund der Brisanz des Themas erhebt diese Arbeit nicht den Anspruch, eine Aussage über die gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Transformationssystemen der Technosphäre anhand der personengebundenen Leistungen zu treffen. Durch den Stand des Wissens beschränkt sich diese Arbeit auf die Sensibilisierung von Entscheidungsträgern hinsichtlich der Folgen getroffener Entscheidungen durch die synthetisierten gesellschaftlichen Indikatorwerte in Form der Beschäftigungszahlen bzw. Einsatzzeiten.

Die Anwendung der erarbeiteten Methodik am fiktiven Beispiel einer neuartigen Verwendung von Neuschrott bestätigt sowohl die Gebrauchstauglich- und Anwendbarkeit wie auch die Brauchbarkeit der erarbeiteten Methodik. Das Beispiel der alternativen Verwendung von Neuschrott hat ein ökologisches Potenzial aufgezeigt. Durch die alternative Verwendung wird der Verschnitt als Gegenstand anderen Produktlebensläufen zur Verfügung gestellt und damit sowohl die Verbrauchsrate an Rohstoffen gesenkt als auch energieintensive Transformationssysteme zum Schmelzen eingespart. Gleichzeitig sind ökonomische und gesellschaftliche positive wie auch negative Wirkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette antizipiert worden, die bei einer Nachhaltigkeitsbetrachtung berücksichtigt werden müssen. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik ermöglicht die Abschätzung der Nachhaltigkeit von antizipierten Transformationssystemen. Weiterhin sind die abfallrechtlichen Rahmenbedingungen und eine Methode zum Antizipieren alternativer Verwendungen erarbeitet worden.

Zukünftig ist die reale Umsetzung einer bereits in der Produktentwicklung antizipierten alternativen Verwendung von Nebenprodukten aus der Fertigung denkbar. Dabei sind insbesondere die Fragen der Losgrößenkopplungen, der Logistik, der Handhabung

und der fertigungstechnischen Bearbeitung nicht genormter Werkstücke zu beantworten. Von Seiten der Informationsbereitstellung ist die Verfügbarkeit von Nebenprodukteigenschaften auf der einen Seite und möglicher zum Substituieren geeigneter Werkstücke der Bearbeitung auf der anderen Seite zu klären. Hier sind Potenziale die durch Industrie 4.0 angestrebte informationstechnische Vernetzung zu untersuchen.

Diese Arbeit hat weiteren Forschungsbedarf sowohl bezüglich der Konstruktionsforschung als auch der Nachhaltigkeitsforschung aufgezeigt. Zwar wird erstmals der logische Zusammenhang zwischen Methoden und Partialmodellen hergestellt. Jedoch fehlen insbesondere Systematisierungs- bzw. Kategorisierungsmerkmale zur Strukturierung unterschiedlicher Spezialisierungen eines Partialmodelles durch unterschiedliche Methoden. Bisher gibt es keine Möglichkeit, ein abstraktes und auf unterschiedlichste Probleme anwendbares Partialmodell terminologisch von einem problemspezifischen Partialmodell zu unterscheiden. Die allgemeine Polynomfunktion  $f = mx + b$  wird ebenso als Partialmodell bezeichnet wie die Spezialisierung des Polynoms zu dem Hookeschen Gesetz oder zu den variablen oder den fixen Kosten. Weiterhin bleibt bei der Entwicklung von Produkten die Rolle des Marketings für die spätere Marktphase des realen Produktes weitgehend unberücksichtigt.

Vonseiten der Nachhaltigkeitsforschung hat sich ebenfalls Forschungsbedarf ergeben. Zwar hat diese Arbeit den Einfluss der Produktentwicklung auf einen Aspekt der gesellschaftlichen Nachhaltigkeit aufgezeigt. Aufgrund des fehlenden modellhaften Verständnisses der gesellschaftlichen Dimension ist eine Analyse des Einflusses der Produktentwicklung über die Technosphäre auf die Gesellschaft nicht möglich. Die personengebundene Leistung eines Transformationssystemes ist als Nachhaltigkeitsindikatorwert synthetisierbar. Die Wirkung von personengebundenen Leistungen in der Technosphäre als Indikatorwert auf das brückenbildende oder bindende Sozialkapital oder auf die Grundbedürfnisbefriedigung oder die Selbstverwirklichung, als oft genannte Indikatoren eines gesellschaftlich nachhaltigen Zustandes, ist gänzlich unklar. Um eine gleichzeitige Analyse der Öko-, Ökono- und Soziosphäre zu gewährleisten, muss ein zur Ökobilanz konsistentes Partialmodell der Gesellschaft erarbeitet werden. Zudem sind die in dieser Arbeit verkürzten Wechselwirkungen der einzelnen Dimensionen der Nachhaltigkeit mit ihren Sphären in Zukunft zu untersuchen und die Wechselwirkungen wissenschaftlich zu erarbeiten und zu belegen. Es wird vorgeschlagen, zunächst die etablierten Theorien und Methoden der in dieser Arbeit herangezogenen Forschungsdisziplinen und ihren Einfluss auf die Erfassbarkeit von Wechselwirkungen zwischen den Sphären einzugehen. Beispielsweise ist zu untersuchen inwieweit die neoklassische als herrschende Wirtschaftstheorie eine (gleichberechtigte) Berücksichtigung von ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Aspekten unterstützt.

Die Arbeit zeigt, dass insbesondere eine prozessuale Betrachtung, sowohl während der Produktentwicklung als auch in der Nachhaltigkeitsforschung, nicht konsequent durchgeführt wird. In der Produktentwicklung kommen hauptsächlich Gestalt- und

Funktionsmodelle zum Einsatz. Unter wirtschaftlichen Betrachtungen werden Wirtschaftseinheiten in unterschiedlichen Aggregationen betrachtet und deren Systemgrenzen arbiträr festgelegt. Forschungsbedarf herrscht besonders im Hinblick auf die Informationsverfügbarkeit von Transformationssystemen und die Bereitstellung prozessualer ökonomischer, ökologischer und gesellschaftlicher Informationen. Um der unterschiedlichen Informationsverfügbarkeit und dem Dilemma der Produktentwicklung gerecht zu werden, sind in dieser Arbeit Transformationssysteme auf den Abstraktionsebenen des Prozessmodelles modelliert worden. In Zukunft ist die Bereitstellung von Informationen von Transformationssystemen, beispielsweise bereits in der Umsetzung von Industrie 4.0, auf ihre Nutzbarkeit für die Entwicklung nachhaltiger Produkte hin zu untersuchen bzw. entsprechend zu implementieren.

## A Anhang

### A.1 Als Genom modellierte Methodenbeschreibung

Bild A-1 modelliert die in Kapitel 4 beschriebene Methodenbeschreibung. Die Modellierung erfolgt durch den Genom-Ansatz nach ZIER.<sup>799</sup>

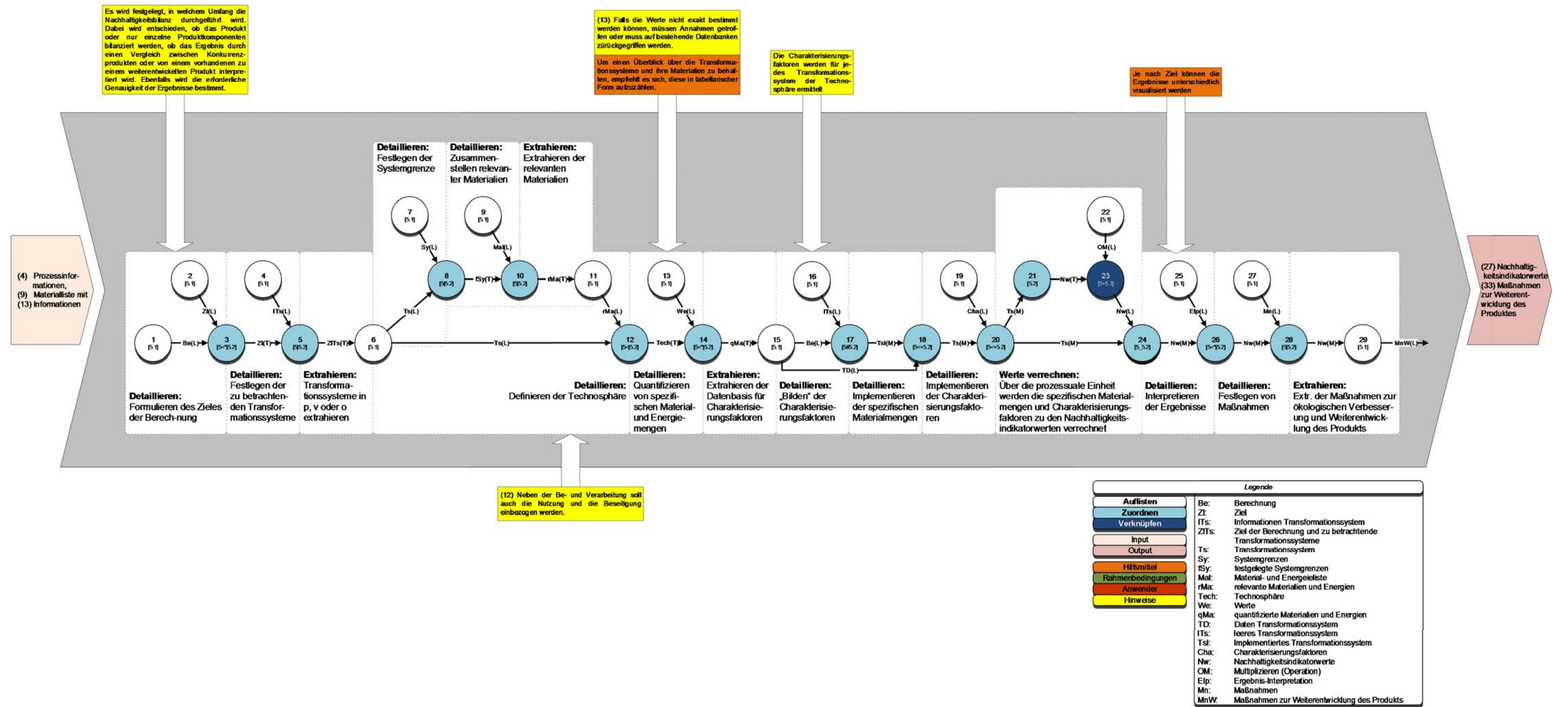


Bild A-1: Als Genom modellierte Methodenbeschreibung der Nachhaltigkeitsbilanzierung

<sup>799</sup> Zier 2014, S. 77ff.

## A.2 Antizipierte Technosphären in Abschnitt 5.4.2

Bild A-2 bzw. Bild A-3 zeigen die als Referenz antizipierten Transformationssysteme bzw. die hinsichtlich der Nachhaltigkeit zu untersuchenden Transformationssysteme der alternativen Verwendung des Fensterausschnittes.

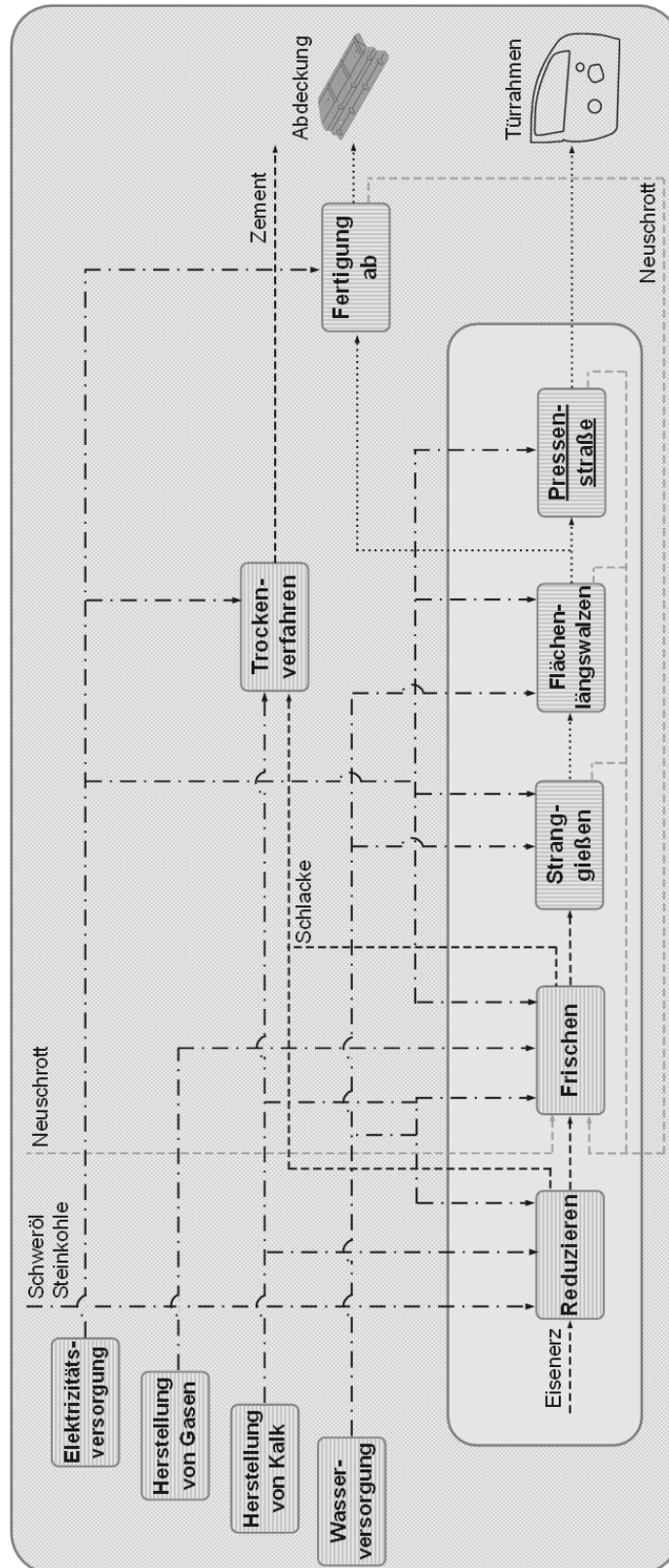


Bild A-2: Die Referenz-Technosphäre

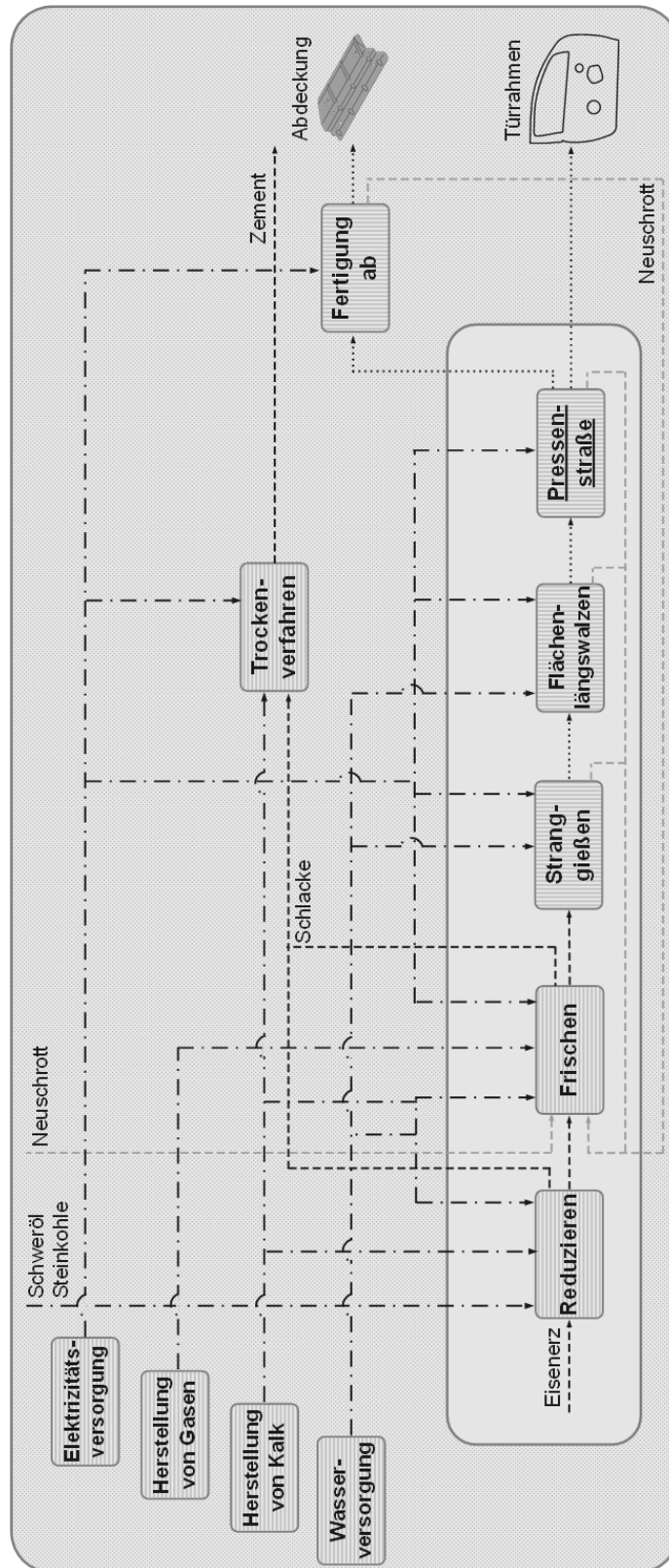


Bild A-3: Die Technosphäre der alternativen Verwendung des Fensterausschnittes

### A.3 Berechnungen und Datenbasen

In diesem Abschnitt werden Berechnungen und Datenbasen zur besseren Nachvollziehbarkeit der in Kapitel 5.4 beispielhaft angewendeten Methodik bereit gestellt. Zudem werden die recherchierten und individualisierten Größen auf ihre Plausibilität hin diskutiert.

#### A.3.1 Berechnungen zu Abschnitt 5.1

Die in diesem Abschnitt individualisierten Werte gelten ebenfalls für die ökonomischen Indikatorwerte des Referenzprozesses des produktentwicklungsnahen Transformationssystemes der Pressenstraße. Diese Annahme ist wegen des gleichen Rahmengewichtes des Vorgängers und des zu entwickelnden Rahmens nach Fn. 662 gerechtfertigt.

Tabelle A-1: Werte für die Berechnung der negativen Wertschöpfung der Pressenstraße des Referenzprozesses

Formelzeichen	Beschreibung	Wert	Einheit	Quelle
$M_{oSpA,ra}$	Menge des Materials aus dem Transformationssystem Servopresse (oSp) am Ausgang (A) zur Fertigung von Teil a mit realer Geometrie r bzw. Referenz	9,14	kg	Hamm 2015
$M_{oSpA,rb}$	Menge des Materials aus dem Transformationssystem oSp am A zur Fertigung von Teil b mit realer Geometrie r	5,21	kg	
$M_{oSpA,rc}$	Menge des Materials aus dem Transformationssystem oSp am A zur Fertigung von Teil c mit realer Geometrie r	2,99	kg	
$Mng_{oSp,ra}$	Materialnutzungsgrad des Transformationssystemes oSp zur Fertigung von Teil a mit realer Geometrie r bzw. Referenz	45,6	%	Birkert et al. 2013, S. 506
$Mng_{oSp,rb}$	Materialnutzungsgrad des Transformationssystemes oSp zur Fertigung von Teil b mit realer Geometrie r	80	%	
$Mng_{oSp,rc}$	Materialnutzungsgrad des Transformationssystemes oSp zur Fertigung von Teil c mit realer Geometrie r	60	%	Annahme, gerundeter Mittelwert aus $Mng_{Spa,r}$ und $Mng_{Spb,r}$

$Mk_{oSp,rT}$	Materialkosten aus Transformationssystem oSp zur Fertigung der Tür (T) mit realer Geometrie r	23	€	Hilfrich et al. 2007, S. 528
$sp_{Ns}$	Spezifischer Preis für Neuschrott (Ns)	0,26	€/kg	EUROFER 2015, S. 2, Mittelwert aus 2014; Stahlwerk Annahütte 2015 gibt einen Mittelwert von 272 €/t an
$Ws_{oSp,rT}$	Wertschöpfung des Transformationssystemes oSp der T mit realer Geometrie r		€	
$Ws_{oSp,ra}$	Wertschöpfung des Transformationssystemes oSp durch a mit realer Geometrie r bzw. Referenz		€	
$Ws_{oSpA,rb}$	Wertschöpfung des Transformationssystemes oSp durch b mit realer Geometrie r		€	
$Ws_{oSp,rc}$	Wertschöpfung des Transformationssystemes oSp durch c mit realer Geometrie r		€	

Berechnung der spezifischen Materialkosten der Bauteile a-c mit der Annahme gleichen Materials:

$$mk_{oSp,rT} = \frac{Mk_{oSp,rT}}{\frac{1}{Mng_{oSp,ra}} M_{oSpA,ra} + \frac{1}{Mng_{oSp,rb}} M_{oSpA,rb} + \frac{1}{Mng_{oSp,rc}} M_{oSpA,rc}} = 0,73 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

Dieser Wert liegt in der Größenordnung der Preise für Tiefziehstähle, beispielsweise DC01 von 780 € je Tonne<sup>800</sup>, oder Warmband, beispielsweise DD11 700 € je Tonne<sup>801</sup>, und ist somit plausibel.

Berechnung des Materialwertes der Tür nach oSp mit der Annahme, dass der Wert des Materials konstant bleibt:

$$Mw_{oSp,rT} = mk_{oSp,rT} * (M_{oSpA,ra} + M_{oSpA,rb} + M_{oSpA,rc}) = 12,66 \text{€}$$

<sup>800</sup> ThyssenKrupp 2013, S. 1ff.

<sup>801</sup> ThyssenKrupp Steel Europe AG 2013, S. 1

$$Mw_{oSp,rNs} = mw_{Ns} \\ * \left( M_{oSpA,ra} \frac{1 - Mng_{oSp,ra}}{Mng_{Spa,r}} + M_{oSpA,rb} \frac{1 - Mng_{oSp,rb}}{Mng_{Spb,r}} \right. \\ \left. + m_{oSpA,rc} \frac{1 - Mng_{oSp,rc}}{Mng_{oSp,rc}} \right) = 3,69 \text{ €}$$

$$Ws_{oSp,rT} = (Mw_{oSp,rT} + Mw_{oSp,rNs}) - Mk_{oSp,rT} = -6,65 \text{ €}$$

$$\frac{Ws_{oSp,rT}}{Mk_{oSp,rT}} = -29 \%$$

Durch die Erzeugung von Neuschrott wird eine negative Wertschöpfung von 6,65 € im Vergleich zum Material am Eingang des oSp hervorgerufen, was einem Wertverlust von 29 % entspricht.

Die Annahme eines konstanten Materialwertes ist als Hilfsmittel der Darstellung des Wertverlustes als Superposition zu der Wertschöpfung zu verstehen. Das Transformationssystem oSp führt zu einer Wertschöpfung aufgrund des Zielpreises. Der Türrahmen beispielsweise erzielt einen Zielpreis von 310 € beim Verkauf als Ersatzteil vom Erstausrüster an einen Händler. Dieser Wert basiert auf dem Listenpreis des Händlers des Türrahmens von 443 €<sup>802</sup>, nach Abzug der Handelsspanne von 30 %<sup>803</sup>. Unter Berücksichtigung der Materialkosten des Rahmens wird durch das Transformationssystem oSp ein Wert von 297,34 € geschöpft.

Als Vergleich der Daten wird hier auf Ebene von Verfahren über die Wz-Gruppe zurückgegriffen. Die Fertigung von Türen erfolgt in Wz 29.20 *Herstellung von Karosserien, Aufbauten und Anhängern*<sup>804</sup> unter der Meldenummer 2920 10 300 für Karosserien. Wz 29.20 fertigt 4709 Karosserien im Wert von 66,28 Mio. €.<sup>805</sup> Unter der Annahme eines durchschnittlichen Karosseriegewichtes von 315 kg<sup>806</sup> beträgt der spezifische Wert 45 € je Kilogramm Karosserie. Der spezifische Wert des Rahmens beläuft sich nach dem Listenpreis auf 48 € je Kilogramm und ist somit plausibel.

Wertschöpfung der Bauteile:

$$Ws_{oSp,ra} = M_{oSpA,ra} * \frac{Mng_{oSp,ra} - 1}{Mng_{oSp,ra}} (mk_{oSp,rT} - mp_{Ns}) = -5,12 \text{ €}$$

$$\frac{Ws_{oSp,ra}}{Ws_{oSp,rT}} = 77 \%$$

<sup>802</sup> Hamm 2015, S. 1

<sup>803</sup> Wollmann 1998, S. 489

<sup>804</sup> Statistisches Bundesamt 2008, S. 310

<sup>805</sup> Statistisches Bundesamt 2014, S. 277

<sup>806</sup> Diese Annahme beruht auf einem durchschnittlichen Karosseriegewichte zwischen 280 kg und 350 kg nach Schindler 2014, S. Q4.

$$Ws_{oSpA,rb} = M_{oSpA,rb} * \frac{Mng_{oSpA,rb} - 1}{Mng_{oSpA,rb}} (mk_{oSp,rT} - mp_{Ns}) = -0,61€$$

$$\frac{Ws_{oSpA,rb}}{Ws_{oSp,rT}} = 9\%$$

$$Ws_{oSp,rc} = M_{oSpA,rc} * \frac{Mng_{oSpA,rc} - 1}{Mng_{oSpA,rc}} (mk_{oSp,rT} - mp_{Ns}) = -0,94€$$

$$\frac{Ws_{oSp,rc}}{Ws_{oSp,rT}} = 14\%$$

Somit hat den größten Einfluss auf die negative Wertschöpfung Bauteil a mit insgesamt 77%.

### A.3.2 Datenbasis der gesellschaftlichen Charakterisierungsfaktoren

Tabelle A-2 bildet die Berechnungsgrundlage des Kehrwertes der Arbeitsproduktivität nach Formel (13).

Tabelle A-2: Berechnungsgrundlage für die gesellschaftlichen Charakterisierungsfaktoren<sup>807</sup>

i,j	$M_{i,j}$	Einheit	Quelle	$B_{i,j}$	Quelle
Ferz,oSp	$7,30 \times 10^7$	kg	(Ott 2015, S. 1), vier Pressenstraßen mit je vier Pressen	170	Ott 2015, S. 1
Ferz,vSs	$7,30 \times 10^7$	kg	(Ott 2015, S. 1), vier Pressenstraßen mit je vier Pressen	170	Ott 2015, S. 1
	$1,83 \times 10^8$	kg	Volkswagen Sachsen GmbH 2015, vier Pressen	350	Tower Automotive Presswerk Zwickau GmbH 2009
	$9,13 \times 10^8$	kg	Pliskat 2014, 38 Anlagen	2000	Pliskat 2014
Eisen,vRe	$1,26 \times 10^{11}$	kg	Wirtschaftsvereinigung Stahl Stahlinstitut VDEh 2013, S. 8f.	74145	Statistisches Bundesamt 2015f, S. 236
Stahl,vFr					
Bramme,vSg					
Ferz,vFlw	$7,82 \times 10^9$	kg	Statistisches Bundesamt 2014, S. 171f.	7155	Statistisches Bundesamt 2015f, S. 237
Zement,vTr	$4,51 \times 10^{10}$	kg	Statistisches Bundesamt 2014, S. 155	8264	Statistisches Bundesamt 2015f, S. 235
Wasser,pWv	$4,49 \times 10^{12}$	kg	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2014	36010	Statistisches Bundesamt 2015e, S. 10
Elektrizität,pEv	$2,21 \times 10^6$	TJ	Statistisches Bundesamt 2015c, in Joule umgerechnet	191864	Statistisches Bundesamt 2015e, S. 9
Kalk,pHK	$3,99 \times 10^{11}$	kg	Statistisches Bundesamt 2014, S. 155	3518	Statistisches Bundesamt 2015f, S. 235
Sauerstoff,pHI	$2,07 \times 10^{10}$	kg	Statistisches Bundesamt 2014, S. 96, in kg umgerechnet	2682	Statistisches Bundesamt 2015f, S. 231

<sup>807</sup> Für die Menge des in den Transformationssystemen umgesetzten Materials oder der Energie  $M_j$  durch  $B_j$ , die durch Wirtschaftszweige modelliert werden, sind die Quartalszahlen nach Statistisches Bundesamt 2014, S. 9ff. aus dem Jahr 2013 aus Gründen der Konsistenz mit der Statistik der Beschäftigungszahlen nach Statistisches Bundesamt 2015f, S. 11ff. für das Jahr 2013 berücksichtigt worden.

### A.3.3 Synthetisierte Indikatorwerte

Tabelle A-3 und Tabelle A-4 fassen die Ergebnisse der Synthese der Nachhaltigkeitsindikatorwerte für die Referenzprozesse und die alternative Verwendung zusammen.

Tabelle A-3: Nachhaltigkeitsindikatorwerte der Referenz

$Nw_{j,s}$	ökologisch				ökonomisch			gesellschaftlich	
	abiot. [kg]	biot. [kg]	Wasser [kg]	Luft [kg]	Umsatz [€]	Kosten [€]	Gewinn Verlust [€]	Beschäftigung [10 <sup>-5</sup> ]	Versorgung [10 <sup>-3</sup> Tage]
Transformationssystem									
Reduzieren	835	2	4920	20532	45,61	21,99	23,62	8,64	53
Frischen	67	0	2387	1126	59,05	58,60	0,45	9,25	57
Stranggießen	4433	36	257275	466734	69,42	67,99	1,44	7,30	45
Flächenlängswalzen	6652	66	276883	859964	83,66	73,21	10,45	10,00	62
Pressenstraße	33	0	605	5411	312,84	26,08	286,76	12,45	77
Fertigung ab	4	0	66	592	70,31	2,67	67,64	0,48	3
Trocknungsverfahren	143	0	1389	16	3,58	1,53	2,05	1,19	7
Wasserversorgung					8,79	-	8,79	238,95	1470
Elektrizitätsversorgung					2,18	-	2,18	80,96	498
Herstellung von Branntkalk					0,10	-	0,10	0,01	0
Herstellung von Industriegasen					0,47	-	0,47	0,14	1

bereits in den Transformationssystemen aggregiert

Tabelle A-4: Nachhaltigkeitsindikatorwerte der alternativen Verwendung

$NW_{j,s}$	ökologisch				ökonomisch			gesellschaftlich	
	abiot. [kg]	biot. [kg]	Wasser [kg]	Luft [kg]	Umsatz [€]	Kosten [€]	Gewinn Verlust [€]	Beschäftigung [10 <sup>-5</sup> ]	Versorgung [10 <sup>-3</sup> Tage]
Transformationssystem									
Reduzieren	675	1	3976	16591	36,85	17,77	19,08	6,98	43
Frischen	55	0	1929	910	47,72	47,46	0,26	7,48	46
Stranggießen	3582	29	207895	377151	56,10	55,01	1,09	5,90	36
Flächenlängswalzen	5375	53	223740	694907	67,60	59,20	8,40	8,08	50
<u>Pressenstraße</u>	33	0	605	5411	313,82	26,08	287,74	12,45	77
Fertigung ab	2	0	44	395	70,03	1,74	68,28	0,30	2
Trocknungsverfahren	116	0	11202	13	2,90	1,24	1,66	0,96	6
Wasserversorgung					7,10	-	7,10	193,09	1188
Elektrizitätsversorgung					1,77	-	1,77	65,63	404
Herstellung von Branntkalk					0,08	-	0,08	0,01	0
Herstellung von Industriegasen					0,47	-	0,47	0,12	1

Die Ergebnisse der ökologischen Nachhaltigkeitsindikatorwerte sind dahingehend plausibel, dass eine abnehmende Nachfrage an Flacherzeugnissen zu einem geringeren Material-Input führt. Die Erhöhung der Liquidität der *Pressenstraße* ist durch folgende Rechnung mit zu Abschnitt A.3.1 konsistenten Vereinfachungen nachvollziehbar. Es erfolgt eine Berechnung der negativen Wertschöpfung zum Vergleich mit Abschnitt A.3.1 für den Türrahmen nach der antizipierten alternativen Verwendung.

Tabelle A-5: Werte für die Berechnung der negativen Wertschöpfung der *Pressenstraße* der alternativen Verwendung

Formelzeichen	Beschreibung	Wert	Einheit	Quelle
$M_{oSpA,ka}$	Menge des Materials des oSp am A von a als k	9,14	kg	Abschnitt A.3.1
$sp_{oSpA,ka}$	Spezifischer Wert von a am A des oSP	0,73	€/kg	Abschnitt A.3.1
$m_{oSpE,ka}$	Spezifische Menge an Flacherzeugnissen des oSp am E des oSP von a als k	2,193	kg/kg	Tabelle 5-8
$mk_{oSpE,ka}$	Spezifische Materialkosten des Flacherzeugnisses am E des oSP zur Fertigung von a als k	0,73	€/kg	Abschnitt A.3.1
$m_{oSpA,kFa}$	Spezifische Menge an Fensterausschnitten (Fa) als k des oSp am A	0,23	kg/kg	Tabelle 5-8
$sp_{Fa}$	Spezifischer Wert des Fensterausschnittes (Fa) als Platine	0,73	€/kg	Entspricht dem Preis für das Längserzeugnis aus Abschnitt A.3.1
$m_{oSpA,kNs}$	Spezifische Menge an Ns als k des oSp am A	0,963	kg/kg	Tabelle 5-8
$sp_{Ns}$	Spezifischer Wert von Neuschrott (Ns)	0,26	€/kg	Tabelle A-1
$Ws_{oSp,ka}$	Wertschöpfung des oSp durch a als k		€	

$$Ws_{oSp,ka} = M_{oSpA,ka} * (sp_{oSpA,ka} + m_{oSpA,kFa} * sp_{Fa} + m_{oSpA,kNs} * sp_{Ns} - m_{oSpE,ka} * mk_{oSpE,ka}) = -4,14€$$

Im Vergleich zu dem Referenzprozess nach Abschnitt A.3.1 und der berechneten negativen Wertschöpfung von  $Ws_{oSp,ra} = -5,15€$  erreicht die alternative Verwendung eine um 0,99€ höhere Wertschöpfung, was identisch zu der errechneten Liquiditätserhöhung liegt. Die restlichen ökonomischen Nachhaltigkeitsindikatorwerte sind dahingehend plausibel, dass trotz der ausschließlich recherchierten Werte keine negativen Erlöse bzw. Liquiditäten berechnet werden. Die Ergebnisse der gesellschaftlichen Nachhaltigkeitsindikatorwerte sind analog zu den Ökologischen dahingehend plausibel, dass eine abnehmende Nachfrage an Flacherzeugnissen zu einer geringeren nötigen personengebundenen Leistung führt.

Der Vergleich zwischen den Referenzprozessen und der alternativen Verwendung zur Fertigung eines Türrahmens entsprechend der prozessualen Einheit nach Abschnitt 4.1 zeigt, dass sich der Material-Input durchschnittlich um 19% verringern lässt.

Auf der ökonomischen Seite verringern sich über sämtliche betrachteten Prozesse die negativen Nominalgüterflüsse um 17,3% und die Positiven um 7,9%. Das führt zu einer Liquiditätsminderung um 2%, wobei die höchste Minderung um 42,6% das Frischen erfährt. Durch die Erhöhung des Materialnutzungsgrades und der resultierenden geringeren Nachfrage an Flacherzeugnissen für die Fertigung der Abdeckung verringert sich die personengebundene Leistung in Form der für die Transformationssysteme nötigen Arbeitskräfte um 18,5%. Besonders ist die Fertigung der Abdeckung mit 37,5% betroffen. Insgesamt verringert sich die Versorgung um 18%. Die alternative Verwendung führt zu einer geringeren Versorgung einer durchschnittlichen Familie um 0,43 Tage.

Zur Individualisierung der absoluten Zahlen wird ein Verhältnis von 50% zwischen verkauften Drei- und Fünftürern und 3,27 Mio.<sup>808</sup> verkauften Fahrzeugen angenommen. Die alternative Verwendung führt aggregiert auf die antizipierten Transformationssysteme insgesamt zu einer Minderung der Liquidität um 78,5 Mio.€, einer Verringerung der Beschäftigten um 6709 und damit um eine geringere Versorgung einer durchschnittlichen Familie um 11.307 Jahre.

---

<sup>808</sup> a. a. O. Fn. 786

## B Glossar

Mit \* gekennzeichnete Begriffe sind bereits in dem Hauptteil dieser Arbeit durch die Literatur belegt worden.

Abhängige Eigenschaften*	Abhängige Eigenschaften werden durch unabhängige Eigenschaften bedingt bzw. stehen in einem kausalen Zusammenhang zu diesen. Nachhaltigkeitseigenschaften sind abhängige Eigenschaften.
Abstraktionsebenen des Prozessmodelles	Mit dem Antizipieren eines Transformationssystemes ausgehend von dem Prozess über das Verfahren hin zu Operatoren steigt die Konkretisierung. Die Konkretisierung führt zu einer Zunahme der synthetisierten Informationen.
Analyse	Die Analyse ist ein Antonym zur Synthese. Sie gliedert ein Problem in kleine Bestandteile und entspricht einer Untersuchung hinsichtlich definierter Kriterien.
Antizipieren	Das Antizipieren ist ein gedankliches Vorwegnehmen bzw. Vorausdenken des virtuellen Produktlebenslaufes eines zu entwickelnden Produktes. Es werden Material- und Energieflüsse der Transformationssysteme innerhalb der Technosphäre synthetisiert.
Beeinflussen	Das Beeinflussen ist das kriterienbasierte Entscheiden über abhängige Eigenschaften des zu entwickelnden Produktes auf Grundlage einer Analyse.
Bindendes Sozialkapital*	Das bindende Sozialkapital ermöglicht eine Interaktion zwischen ähnlichen Menschen, beispielsweise Familienmitgliedern.
Brückenbildendes Sozialkapital*	Das brückenbildende Sozialkapital ermöglicht eine Interaktion zwischen unterschiedlichen Menschen, beispielsweise Arbeitskollegen.
Charakterisierungsfaktor*	Der Charakterisierungsfaktor dient der Individualisierung der antizipierten Material- und Energieflüsse in die gemeinsame Einheit des Nachhaltigkeitsindikatorwertes.
Dilemma der Produktentwicklung*	Das Dilemma der Produktentwicklung beschreibt die Gegenläufigkeit der Änderungsmöglichkeiten mit steigendem Informationszuwachs während der Produktentwicklung. Dieser Sachverhalt trifft auf die ökologischen, ökonomischen wie auch gesellschaftlichen Merkmale des zu entwickelnden Produktes zu.

---

Entwicklung nachhaltiger Produkte*	Die Entwicklung nachhaltiger Produkte erfolgt unter der gleichwertigen Berücksichtigung der ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Wirkung des zu entwickelnden Produktes. Ihr Ziel ist das Erreichen eines nachhaltigen Zustandes.
Fabrikationsprozess	Fabrikationsprozesse sind Transformationssysteme, die das zu entwickelnde Produkt bzw. seine Materialien gewinnen, bearbeiten, verarbeiten oder beseitigen.
Fertigungstechnisch ähnliche Verfahren	Fertigungstechnisch ähnliche Verfahren realisieren Prozesse der Rohstoffgewinnung. Die Verfahren ähneln in ihrer Beschreibung den Fertigungsverfahren. Es erfolgt keine Bearbeitung von Gegenständen sondern von Rohstoffvorkommen in der Ökosphäre.
Fertigungstechnische Bearbeitung	Die fertigungstechnische Bearbeitung, oder nur Bearbeitung, entspricht der Produktion bzw. der Aufarbeitung zur Verwendung. Dabei werden Gegenstände, durch schrittweises Verändern der Form oder der Stoffeigenschaften oder beidem transformiert.
Festlegen	Das Festlegen ist das Treffen von Entscheidungen, ohne eine Analyse der Wirkung der Entscheidungen.
Gegenstand	Gegenstände sind formbehaftete Materialien und werden über ihre extensiven Eigenschaften beschrieben. Sie entsprechen nach DIN 8580 geometrisch bestimmten festen Körpern und sind aufgrund ihrer Merkmale in einer technischen Zeichnung darstellbar.
Individualmodell	Das Individualmodell ist das Ergebnis der Individualisierung eines Partialmodelles. Sie entspricht der Synthese einer Datenbasis zu einem nicht weiter konkretisierbaren Modell.
Nachhaltigkeitsindikator	Die Nachhaltigkeitsindikatoren dienen der Beschreibung des Zustandes der Nachhaltigkeitssphären nach der Zustandsänderung aufgrund des Überganges der Nachhaltigkeitsindikatorwerte aus der Technosphäre in die Sphären der Nachhaltigkeit.

---

Nachhaltigkeitsindikatorwert	Die Nachhaltigkeitsindikatorwerte entsprechen der Individualisierung der Material- und Energieflüsse der antizipierten Transformationssysteme der Technosphäre über Charakterisierungsfaktoren. Nach dem Übergang in die Öko-, Ökono- und Soziosphäre rufen sie eine Wirkung hervor.
Ökonosphäre	Die Ökonosphäre umfasst wirtschaftliche Prozesse. Die Ökonosphäre einzelner Unternehmen entspricht der jeweiligen Finanzwirtschaft.
Ökosphäre	Die Ökosphäre grenzt die natürliche Umwelt ab. In ihr führen physikalische, chemische und biologische Prozesse aufgrund der in den technosphärischen Transformationssystemen hervorgerufenen Emissionsein- und Rohstoffausträge zu einer Umweltwirkung.
Operator*	Ein Operator stellt über die Transformation von Eingangsgrößen eine Wirkgröße zur Transformation eines Operanden zur Verfügung.
Partialmodell	Ein Partialmodell ist ein Modell, das eine Datenbasis zu einem Individualmodell individualisiert. Unter Betrachtung der Konkretisierung liegt es auf einer Ebene zwischen dem generischen Modell und dem Individualmodell.
Produktentwicklungsferne Transformationssysteme	Produktentwicklungsferne Transformationssysteme zeichnen sich durch einen informatorischen Abstand wegen einer organisatorischen Ferne aus.
Produktentwicklungsnahe Transformationssysteme	Produktentwicklungsnahe Transformationssysteme zeichnen sich durch eine informatorische Nähe über einen geringen organisatorischen Abstand zu der Produktentwicklung aus.
Prozess*	Ein Prozess ist eine abstrakte sprachliche Beschreibung einer gewünschten Zustandsänderungen eines Operanden. Sprachlich kann er beispielsweise den Hauptgruppen, Gruppen oder Untergruppen nach DIN 8580 entsprechen.
Prozessuale Einheit	Die prozessuale Einheit, oder zweckerfüllende Einheit, ist die quantitative Erfassung des Zielzustandes eines Transformationssystemes für die Verwendung als Vergleichseinheit bzw. Referenzeinheit einer Nachhaltigkeitsbilanzierung.

---

Referenz	Das Referenz-Transformationssystem, oder nur Referenz, dient bei der Nachhaltigkeitsbilanzierung als Vergleichstransformationssystem.
Rohstoff	Ein Rohstoff ist ein formloser Stoff, der noch keine anthropogene Be- oder Verarbeitung erfahren hat. Er wird, unter Beibehaltung der chemischen Eigenschaften, der Ökosphäre entnommen.
Soziosphäre*	Die Soziosphäre, oder Gesellschaft, ist die Gesamtheit der Menschen, die zusammen unter bestimmten politischen, wirtschaftlichen und sozialen Verhältnissen leben. Sie grenzt sich territorial von anderen Gesellschaften ab und ist durch eine normative Sozialstruktur geprägt.
Sphäre	Eine Sphäre ist ein abgegrenztes System, in dem ökologische, ökonomische oder gesellschaftliche Prozesse ablaufen. Sie kann auf unterschiedlichen Aggregationsebenen betrachtet werden.
Stoff*	Ein Stoff ist ein formloses Material. Er wird durch intensive Eigenschaften beschrieben.
Synthese*	Die Synthese ist eine Informationsverarbeitung durch Bilden von Verbindungen, durch Verknüpfen von Elementen mit insgesamt neuen Wirkungen. Während der Produktentwicklung wird durch die Synthese ein Informationszuwachs durch die Individualisierung einer Datenbasis über Partialmodelle zu einem Individualmodell erreicht.
Technosphäre	Die Technosphäre beinhaltet sämtliche (anthropogenen) antizipierten Transformationssysteme, die direkt oder indirekt über Material- und Energieflüsse mit dem zu entwickelnden Produkt in Verbindung stehen.
Transformationssystem*	Ein Transformationssystem modelliert einen technischen Prozess über die Merkmale Prozess, Verfahren, Operand und über verschiedene Flüsse und Größen. Ein Transformationssystem kann aus mehreren Teilprozessen bestehen. Bei einer betriebswirtschaftlichen Betrachtung wird von leistungswirtschaftlichen Prozessen als Synonym für das Transformationssystem gesprochen.
Unabhängige Eigenschaften*	Unabhängige Eigenschaften werden durch den Konstrukteur festgelegt. Sie stehen in keinem kausalen Zusammenhang zu anderen Produkteigenschaften.

---

---

Verbindendes Sozialkapital	Das verbindende Sozialkapital ermöglicht die Interaktion zwischen Menschen und der institutionellen Ebene einer Gesellschaft.
Verfahren*	Verfahren realisieren Prozesse. Sie entsprechen beispielsweise den Ordnungsnummern einzelner Gruppen bzw. Untergruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580.
Verfahrenstechnisch ähnliche Verfahren	Verfahrenstechnisch ähnliche Verfahren realisieren beispielsweise Prozesse der Rohstoffgewinnung. Ihre Beschreibung ähnelt der Beschreibung der Verfahrenstechnik. Es erfolgt keine Verarbeitung des Stoffes, beispielsweise des Rohstoffes, seine chemischen Eigenschaften bleiben erhalten. Es werden Hilfsstoffe chemisch transformiert wie Sprengstoffen oder das sog. Fracfluid zum Abbau von Rohstoffen.
Verfahrenstechnische Verarbeitung	Die verfahrenstechnische Verarbeitung, oder nur Verarbeitung, entspricht der Werkstoffherstellung bzw. der Aufbereitung zur Verwertung. Stoffe werden nach Art, Eigenschaft und Zusammensetzung chemisch verarbeitet und somit ihre intensiven Eigenschaften transformiert.
Verwendung	Siehe fertigungstechnische Bearbeitung
Verwertung	Siehe verfahrenstechnische Verarbeitung

---

## Eigene Veröffentlichungen

### 2013

Ćorić, M.; Birkhofer, H.; Kloberdanz, H. (2013): Recycling Methods - Developing a uniform terminology using the process model and the properties theory. In: Proceedings of the 8th Ecodesign 2013. International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Jeju, Korea, 4.12.2013. Seoul: Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), S. 1-5.

### 2015

Ćorić, M.; Lommatzsch, N.; Kloberdanz, H.; Birkhofer H. (2015): The influence of alternative recycling processes on employee numbers. In: D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković und N. Bojčetić (Hg.): DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference. Cavtat, 19.05.2015. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, S. 1511-1520.

Groche, P.; Hohmann, J.; Kessler, T.; Schreiner, J.; Krech, M.; Duschka, A.; Monnerjahn, V.; Ćorić, M. (2015): Industrie 4.0 – Forschung am PtU. In: P. Groche (Hg.): 12. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt. »Industrie 4.0 in der Umformtechnik«. Bamberg: Meisenbach Verlag GmbH, S. 27-47.

## **Betreute studentische Arbeiten**

### **2011**

Budde, L. (2011): Stand der Forschung im Bereich der Miniatur- und Mikro-Maschinenelemente.

### **2012**

Gunkel, A. (2012): Auslegung einer angepassten Entwicklungsmethodik für Mikro-Maschinenelemente.

Gusak, A. (2012): Konzeptionierung eines Messprinzipes zur Erfassung vollständiger Geometrielemente kleinster Wellen.

Kranz, I. (2012): Konzeptionierung und Bau eines Prüfstandes zur Messung übertragbarer Drehmomente bei Mikro-Welle-Nabe-Verbindungen.

Lal, M. J. (2012): Entwicklung einer Berechnungsmethode zum Auslegen von Pressverbänden mit vollplastischem Außenteil.

Laufer, F. (2012): Konzeptionierung eines Messprinzipes zur Erfassung vollständiger Geometrielemente kleinster Bohrungen.

Müller, C. (2012): Beurteilung der Berechnungsmethoden aus der Richtlinie VDI 2731 Blatt 1 zur Auslegung von Mikrogetrieben.

Uygun, B. (2012): Erstellung und Validierung eines Finite-Elemente-Modells für Längspressverbände mit AnSys 14.

### **2013**

Blume, C. (2013): Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung – Digitale Fabrik: Methoden und Instrumente zur Entwicklung von Produkten im Sinne der ganzheitlichen Nachhaltigkeit.

Keller, T.; Krumbein, B.; Werner, J.; Wetz, T.; Zech, P. (2013): Konzeptionierung, Bau und Evaluierung eines preiswerten 3D-Scanners.

Strauß, D. (2013): Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung – Folgen des Recyclings auf den Arbeitsmarkt.

### **2014**

Grau, P. (2014): Abschätzung der Umweltwirkung unterschiedlicher Recyclingstrategien.

Müller, M. (2014): Quantitative Erfassung der Wertigkeit unterschiedlicher Werkstücke im Produktlebenslauf.

Reiter, M. (2014): Konzipierung einer Datenbank zur Erfassung von Verschnitteigenschaften.

Schell, L. (2014): Konzipierung und Umsetzung eines Hilfsmittels zur rechnerbasierten Bewertung von Ähnlichkeiten unterschiedlicher Werkstücke.

Zilinsky, F. (2014): Verfahrensbasierte Abschätzung der ökonomischen Wirkung unterschiedlicher Recyclingstrategien.

## **2015**

Blanc, R. A. C. (2015): Quantitative Abschätzung des Einflusses der Produktentwicklung auf die Nachhaltigkeit in der Wertschöpfung.

Kirchner, S. (2015): Methoden zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten während des Produktentwicklungsprozesses.

Schulz, A. (2015): Abschätzung ökonomischer Faktoren durch Daten aus der Bilanzierung von Umweltwirkung während der Produktentwicklung.

## Literaturverzeichnis

Abele, E.; Anderl, R.; Birkhofer, H. (Hg.) (2005): Environmentally-friendly product development. Methods and tools. London Berlin Heidelberg: Springer.

ADAC (2014): Zwischen Herstellerangaben und Wirklichkeit. Wie viel darf mein Auto verbrauchen? Online verfügbar unter <https://www.adac.de/infotestrat/fahrzeugkauf-und-verkauf/neufahrzeuge/verbrauch/default.aspx?prevPageNFB=1>, zuletzt geprüft am 16.04.2015.

Adam, F.; Roncevic, B. (2005): Sozialkapital als eine sinnvolle wissenschaftliche Metapher in der Soziologie. In: N. B. Genov (Hg.): Die Entwicklung des soziologischen Wissens. Ergebnisse eines halben Jahrhunderts. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 213-219.

Albers, A.; Lohmeyer, Q. (2012): Advanced Systems Engineering – Towards a Model-Based and Human-Centered Methodology. In: I. Horváth (Hg.): Tools and methods of competitive engineering. Proceedings of the Ninth International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering, TMCE 2012, May 7 - 11, 2012, Karlsruhe, Germany. Delft: Faculty of Industrial Design Engineering Delft University of Technology, S. 407-416.

Allwood, J. M. et al. (2012): Sustainable materials – With both eyes open. Cambridge, England: UIT Cambridge Ltd..

AltfahrzeugV: Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen vom 05.12.2013.

Anderl, R.; Melk, K. (2005): Introduction. In: E. Abele, R. Anderl und H. Birkhofer (Hg.): Environmentally-friendly product development. Methods and tools. London Berlin Heidelberg: Springer, S. 1-8.

Andreasen, M. M.; Hein, L. (1987): Integrated product development. Bedford: IFS Publications Ltd.

Arthur D. Little GmbH; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung Fh-ISI; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (2005): Studie zur Konzeption eines Programms für die Steigerung der Materialeffizienz in mittelständischen Unternehmen. Abschlussbericht. Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. Wiesbaden.

Atik, A. (2001): Entscheidungsunterstützende Methoden für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. Aachen: Shaker Verlag GmbH.

Avgoustinov, N. (2007): Modelling in mechanical engineering and mechatronics. Towards autonomous intelligent software models. London: Springer.

AVV: Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis. vom 24.02.2012.

Bahadir, M.; Parlar, H.; Spitteller, M. (Hg.) (2000): Springer Umweltlexikon. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

Bardt, H. (2011): Indikatoren ökonomischer Nachhaltigkeit. Köln: Institut der deutschen Wirtschaft Köln.

Barthelmes, H. (2013): Handbuch Industrial Engineering. Vom Markt zum Produkt. München Wien: Carl Hanser Verlag.

- Barz, K. (2015): Einwegkreislauf sichert Arbeitsplätze. Wachsende Arbeitsmarktzahlen in der alkoholfreien Getränkeindustrie bei steigender Einweg- und sinkender Mehrwegquote. Online verfügbar unter <http://www.presseportal.de/pm/116265/2970230/einwegkreislauf-sichert-arbeitsplaetze-wachsende-arbeitsmarktzahlen-in-der-alkohol-freien>, zuletzt geprüft am 12.05.2015.
- Becker, C.; Grebe, T.; Kirbach, M. (2009): Endbericht zu der wirtschaftlichen Bedeutung der Recycling- und Entsorgungsbranche in Deutschland. Stand, Hemmnisse, Herausforderungen. GIB Gesellschaft für Innovationsforschung und Beratung mbH. Berlin.
- Becker, J.; Rosemann, M.; Schütte, R. (1995): Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. In: *Wirtschaftsinformatik* 37, S. 435-445.
- Becker, M.; Büchel, A.; Haberfellner, R.; von Massow, H.; Nagel, P. (1992): Teil II: Systemgestaltung. In: W. Daenzer und F. Huber (Hg.): *Systems engineering. Methodik und Praxis*. Zürich: Verlag Industrielle Organisation, S. 78-235.
- Benoît, C.; Mazijn, B. (2009): Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. Social and socio-economic LCA guidelines complementing environmental LCA and Life Cycle Costing, contributing to the full assessment of goods and services within the context of sustainable development. Paris: UNEP-DTIE.
- Berger, B. (2004): Modularisierung von Wissen in der Produktentwicklung. Ein Beitrag zur einheitlichen Aufbereitung und individuellen Nutzung in Lehre und Praxis. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Berkau, C. (1998): Instrumente der Datenverarbeitung für das effiziente Prozesscontrolling. In: *Kostenrechnungspraxis (Sonderheft 2)*, S. 27-32.
- Berkman, L.; Glass, T. (2000): Social Integration, Social Networks, Social Support, and Health. In: L. Berkman und I. Kawachi (Hg.): *Social epidemiology*. New York, New York: Oxford University Press, Inc., S. 137-173.
- Biesalski & Company (2014): Wertschöpfungsreport Nachhaltigkeit 2014. Was ist gutes Gewissen wert?. Online verfügbar unter [http://www.biesalski-company.com/cms\\_content/download/Wertschoepfungsreport\\_Nachhaltigkeit\\_2014.pdf](http://www.biesalski-company.com/cms_content/download/Wertschoepfungsreport_Nachhaltigkeit_2014.pdf), zuletzt geprüft am 07.01.2016.
- Bibliographisches Institut GmbH (2014a): Duden online, funktional. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/rechtschreibung/funktional>, zuletzt geprüft am 26.06.2015.
- Bibliographisches Institut GmbH (2014b): Duden online, funktionell. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/rechtschreibung/funktionell>, zuletzt geprüft am 26.06.2015.
- Bibliographisches Institut GmbH (2014c): Duden online, Gesellschaft. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/rechtschreibung/Gesellschaft>, zuletzt geprüft am 17.12.2014.
- Bibliographisches Institut GmbH (2014d): Duden online; Gegenstand. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/node/646426/revisions/1265168/view>, zuletzt geprüft am 18.02.2014.
- Bibliographisches Institut GmbH (2014e): Duden online; Rohstoff. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/node/778204/revisions/1139126/view>, zuletzt geprüft am 18.02.2014.
- Bibliographisches Institut GmbH (2014f): Duden online; sozial. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/rechtschreibung/sozial>, zuletzt geprüft am 22.09.2014.

- Bibliographisches Institut GmbH (2014g): Duden online; Stoff. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/node/649531/revisions/1318876/view>, zuletzt geprüft am 18.02.2014.
- Bibliographisches Institut GmbH (2016): Duden online; Versorgungsleistung. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/rechtschreibung/Versorgungsleistung>, zuletzt geprüft am 12.01.2016.
- Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M. (2013): Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Auslegung von Ziehanlagen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Birkhofer, H.; Dannheim, F.; Grüner, C. (1998): Umwelt- und Marktgerechte Produkte. Utopie oder Ernsthaftes Entwicklungsziel. In: VDI Berichte 1400: Markt- und Kostenvorteile durch Entwicklung Umweltverträglicher Produkte, S. 1-18.
- Birkhofer, H.; Grüner, C. (2002): Holistic Design for Environment and Market: Methodology and Computer Support. In: M. S. Hundal (Hg.): Mechanical life cycle handbook. Good environmental design and manufacturing. New York: Marcel Dekker, S. 217-244.
- Birkhofer, H.; Rath, K.; Zhao, S. (2012): Umweltgerechtes Konstruieren. In: F. Rieg und R. Steinhilper (Hg.): Handbuch Konstruktion. München Wien: Carl Hanser Verlag, S. 561-582.
- Birkhofer, H.; Wäldele, M. (2008): Properties and Characteristics and Attributes and... – an Approach on structuring the Description of Technical Systems. In: V. Vaněk, S. Hosnedl und J. Barták (Hg.): Proceedings of AEDS 2008 Workshop, Pilsen, Czech Republic. Pilsen: University of West Bohemia, S. 19-34.
- Blank, J. E. (2001): Sustainable Development. In: W. Schulz, C. J. Burschel und M. Weigert (Hg.): Lexikon Nachhaltiges Wirtschaften. München: Oldenbourg Verlag, S. 249-252.
- Blass, E.; Hampe, M. (1989): Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse. Methode – Zielsuche – Lösungssuche – Lösungsausw. Frankfurt am Main, Aarau: Salle; Sauerländer.
- Blazejczak, J.; Edler, D.; Spangenberg, J. H.; Hildebrandt, E.; Weidner, H.; Bach, S. et al. (2000): Verbundprojekt Arbeit und Ökologie. Abschlußbericht zum Projekt Nr. 97-959-3; gefördert von der Hans-Böckler-Stiftung im Schwerpunkt "Perspektiven der Arbeitsgesellschaft. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Berlin.
- Bleischwitz, R.; Guesnet, L. (2012): Conflict Minerals. In: D. E. Vasey, S. Fredericks und S. L. Thompson Shirley (Hg.): Berkshire encyclopedia of sustainability. Great Barrington, MA: Berkshire Publishing, S. 82-88.
- Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A.; Wallace, K. (1995): A Design Research Methodology. In: V. Hubka (Hg.): Proceedings of ICED 95. 10th International Conference on Engineering Design, August 22-24, 1995, Czech Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Praha. Zürich: Heurista (23), S. 50-55.
- Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A. (2009): DRM, a design research methodology. Dordrecht Heidelberg London New York: Springer-Verlag London Limited.
- BMUB (2002): Prozess-Datensatz: Bewehrungsstahl (de). Online verfügbar unter <http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=7ae93f68-b000-4de3-8802-86204f1d401e>, zuletzt geprüft am 27.07.2015.

BMUB (2008): Probas. MetallFe-roh-DE-2030. Online verfügbar unter [www.probas.umweltbundesamt.de/php/web2pdf.php?id={38940AE5-D32D-42C5-AF86-0E4DE04F9641}](http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/web2pdf.php?id={38940AE5-D32D-42C5-AF86-0E4DE04F9641}), zuletzt geprüft am 24.07.2014.

BMUB (2010): Probas. MetallStahl-Oxygen-DE-2030. Online verfügbar unter [www.probas.umweltbundesamt.de/php/web2pdf.php?id={3BB816AD-3481-4F2F-BEFE-C88ECC96A9E2}](http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/web2pdf.php?id={3BB816AD-3481-4F2F-BEFE-C88ECC96A9E2}), zuletzt geprüft am 24.07.2015.

BMUB (2011): Prozess-Datensatz: Edelstahl, kaltgewalzt - Outokumpu (de). Online verfügbar unter <http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=2be40194-4146-4313-b130-393888c3b97a>, zuletzt geprüft am 28.07.2015.

BMUB (2015): ProBas. Steine-ErdenZement-DE-2030. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/web2pdf.php?id={4899BEB3-29E8-44F7-8B6D-51C1FC5B0BC2}>, zuletzt geprüft am 04.08.2015.

Bode, M.; Bünting, F.; Geissdörfer, K. (2011): Rechenbuch der Lebenszykluskosten. Ein Leitfaden mit Rechenmodell und Arbeitshilfen. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH.

Bohne, D. (2014): Technischer Ausbau von Gebäuden: Und nachhaltige Gebäudetechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Boms, A. (2008): Unternehmensverantwortung und Nachhaltigkeit. Umsetzung durch das Sustainability-Performance-Measurement. Lohmar Köln: JOSEF EUL VERLAG GmbH.

Borsdorf, R. (2007): Methodischer Ansatz zur Integration von Technologiewissen in den Produktentwicklungsprozess. Aachen: Shaker Verlag.

Bossel, H. (2004): Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Norderstedt: Books on Demand GmbH.

Boulding, K. E. (2006): Die Ökonomik des zukünftigen Raumschiffs Erde. In: S. Höhler und F. Luksw (Hg.): Beam us up, Boulding! 40 Jahre "Raumschiff Erde". Berlin: Vereinigung für Ökologische Ökonomie e.V., S. 9-21.

Boulding, K. E. (1978): Ecodynamics. A new theory of societal evolution. Beverly Hills: Sage Publications.

Bourdieu, P. (1983): Ökonomisches Kapital, kulturelles Kapital, soziales Kapital. In: Reinhard Kreckel (Hg.): Soziale Ungleichheiten. Göttingen: Schwartz, S. 183-198.

Brandl, S.; Hildebrandt, E. (2002): Zukunft der Arbeit und soziale Nachhaltigkeit. Zur Transformation der Arbeitsgesellschaft vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeitsdebatte. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Brock, W. E.; Norwood, Janet L. (1985): The Impact of Technology on Labor in Four Industries. Washington, D. C.: U.S. Government Printing Office.

Brugger, F. (2010): Nachhaltigkeit in der Unternehmenskommunikation. Bedeutung, Charakteristika und Herausforderungen. Wiesbaden: Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Bruner-Newton, I.; Lenz, H. P. (1981): Nutzen-Kosten-Analyse für Energiesparmaßnahmen auf dem Sektor Kraftwagenverkehr. New York: Springer Science+Business Media.

BT-Drs 17/6052: Entwurf eines Gesetzes zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts. vom 06.06.2011. Fundstelle: Drucksache 17/6052. Online verfügbar unter <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/060/1706052.pdf>, zuletzt geprüft am 04.03.2013.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2014): Entwicklung der Wasserabgabe 1990 bis 2013. Deutschland. Online verfügbar unter [www.bdew.de/internet.nsf/id/EC09360DDBF9F439C125786C004274E5/\\$file/Entwicklung%20der%20Wasserabgabe%201990%20bis%202013p%20D.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/EC09360DDBF9F439C125786C004274E5/$file/Entwicklung%20der%20Wasserabgabe%201990%20bis%202013p%20D.pdf), zuletzt geprüft am 27.07.2015.

Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. (2009): bvse-Schrottmarktinfo Nr. 013. Online verfügbar unter [www.fischer-soehne.de/uploads/Januar%2009%20bvse.pdf](http://www.fischer-soehne.de/uploads/Januar%2009%20bvse.pdf), zuletzt geprüft am 21.05.2014.

Bundesverwaltungsamt (2013): Konventionenhandbuch (Teil 1) für eine einheitliche Prozessmodellierung. Online verfügbar unter [http://www.cio.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Architekturen-und-Standards/konventionenhandbuch\\_Teil1\\_download.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.cio.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Architekturen-und-Standards/konventionenhandbuch_Teil1_download.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 25.09.2014.

Burger, M. (2012): Wirtschaftlichkeit von Stanzprozessen: Wesentliche Einflussfaktoren und Konsequenzen: Books on Demand.

Burgmaier, R. (2010): Kurzarbeit bei Badischen Stahlwerken: 800 Mitarbeiter bleiben daheim. Online verfügbar unter <http://www.badische-zeitung.de/kehl/kurzarbeit-bei-badischen-stahlwerken-800-mitarbeiter-bleiben-daheim--34897065.html>, zuletzt geprüft am 23.06.2015.

Busemann, J. (1991): Materie und Stoff. Betrachtungen über Grundbegriffe der Chemie. In: *LaboratoriumsMedizin* 15 (11), S. 570-580.

Chan, E.; Lee, G. L. (2007): Critical factors for improving social sustainability of urban renewal projects. In: *Social Indicators Research* 85 (2), S. 243-256.

Claussen, P. (2012): Die Fabrik als soziales System. Wandlungsfähigkeit durch systemische Fabrikplanung und Organisationsentwicklung – ein Beispiel aus der Automobilindustrie. Wiesbaden: Gabler-Verlag | Springer Fachmedien.

cohn&wolf; Esty Environmental Partners; Landor; Penn Schoen Berland (2010): Global Media Deck. 2010 ImagePower® Green Brands Survey. Online verfügbar unter [http://www.cohnwolfe.com/sites/default/files/whitepapers/2010\\_GreenBrands\\_Global.pdf](http://www.cohnwolfe.com/sites/default/files/whitepapers/2010_GreenBrands_Global.pdf), zuletzt geprüft am 24.03.2015.

Coleman, J. S. (1988): Social Capital in the Creation of Human Capital. In: *American Journal of Sociology* 94, S. 95-120.

Coleman, J. S. (1994): *Foundations of Social Theory*. Harvard: Harvard University Press.

Conrad, K.-J. (2013): *Grundlagen der Konstruktionslehre. Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik; mit 107 Tabellen, zahlreichen Kenntnisfragen und Aufgabenstellungen mit Lösungen*. München: Hanser.

Ćorić, M.; Birkhofer, H.; Kloberdanz, H. (2013): Recycling Methods – Developing a uniform terminology using the process model and the properties theory. In: *Proceedings of the 8th Ecodesign 2013. International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*. Jeju, Korea, 4.12.2013. Seoul: Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), S. 1-5.

- Ćorić, M.; Lommatzsch, N.; Kloberdanz, H.; Birkhofer H. (2015): The influence of alternative recycling processes on employee numbers. In: D. Marjanović, M. Štorga, N. Pavković und N. Bojčetić (Hg.): DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference. Cavtat, 19.05.2015. Zagreb: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, S. 1511-1520.
- Curtius, B. (1995): Quality function deployment in der westdeutschen Automobil- und Zulieferindustrie. Versuch einer Darstellung hemmender und fördernder Faktoren. Aachen: Shaker Verlag.
- Dangelmaier, W. (2001): Fertigungsplanung. Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Dannheim, F.; Birkhofer, H. (1998): Die Bedeutung der Nutzungsphase für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. In: Konstruktion 50 (3), S. 27-37.
- Dannheim, F. (1999): Die Entwicklung umweltgerechter Produkte im Spannungsfeld von Ökologie und Ökonomie. Eine Analyse unter besonderer Berücksichtigung der Nutzungsphase. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Detzel, A.; Krüger, M.; Kauertz, B., Giegrich, J.; Schmidt, A. (2010): Einweg und Mehrweg. Aktuelle Ökobilanzen im Blickpunkt. Online verfügbar unter [https://www.ifeu.de/oekobilanzen/pdf/IFEU%20Handreichung%20zur%20Einweg-Mehrweg-Diskussion%20\(13Juli2010\).pdf](https://www.ifeu.de/oekobilanzen/pdf/IFEU%20Handreichung%20zur%20Einweg-Mehrweg-Diskussion%20(13Juli2010).pdf)., zuletzt geprüft am 12.05.2015.
- Dierkes, M. (1974): Die Sozialbilanz. Ein gesellschaftsbezogenes Informations- und Rechnungssystem. Frankfurt New York: Herder und Herder GmbH.
- Dietrich, J.; Tschätsch, H. (2014): Praxis der Zerspantechnik. Verfahren, Werkzeuge, Berechnung. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- DIN 199 Blatt 1 (2002): Technische Produktdokumentation – CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten - Teil 1: Begriffe.
- DIN 8580 (2003): Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.
- DIN 8583 Blatt 2 (2003): Fertigungsverfahren Druckumformen – Teil 2: Walzen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- DIN 8593 Blatt 0 (2003): Fertigungsverfahren Fügen – Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- DIN 8589 Blatt 1 (2003): Fertigungsverfahren Spanen – Teil 1: Drehen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- DIN 8589 Blatt 3 (2003): Fertigungsverfahren Spanen – Teil 3: Fräsen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- DIN 8588 (2003): Fertigungsverfahren Zerteilen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- DIN 8584 Blatt 3 (2003): Fertigungsverfahren Zugdruckumformen – Teil 3: Tiefziehen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- DIN 69901 Blatt 2 (2009): Projektmanagement – Projektmanagementsysteme - Teil 2: Prozesse, Prozessmodell.
- DIN 2330 (2013): Begriffe und Benennungen – Allgemeine Grundsätze.
- DIN 1164 Blatt 10 (2013): Zement mit besonderen Eigenschaften – Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt.

- DIN EN 10130 (2007): Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen.
- DIN EN 45020 (2007): Normung und damit zusammenhängende Tätigkeiten – Allgemeine Begriffe
- DIN EN ISO 10628 (2001): Fließschemata für verfahrenstechnische Anlagen – Allgemeine Regeln.
- DIN EN ISO 14044 (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.
- DIN EN ISO 19439 (2007): Unternehmensintegration – Rahmenwerk für Unternehmensmodellierung.
- DIN EN ISO 14040 (2009): Umweltmanagement – Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- DIN EN ISO 14051 (2011): Umweltmanagement – Materialflusskostenrechnung - Allgemeine Rahmenbedingungen.
- DIN EN ISO 14021 (2012): Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Umweltbezogene Anbietererklärungen
- DIN ISO 15226 (1999): Technische Produktdokumentation – Lebenszyklusmodell und Zuordnung von Dokumenten.
- DIN ISO 128 Blatt 1 (2003): Technische Zeichnungen – Allgemeine Grundlagen der Darstellung - Teil 1: Einleitung und Stichwortverzeichnis.
- Dings, J. (2013): Mind the Gap! Why official car fuel economy figures don't match up to reality. Online verfügbar unter [www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Real%20World%20Fuel%20Consumption%20v15\\_final.pdf](http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Real%20World%20Fuel%20Consumption%20v15_final.pdf), zuletzt geprüft am 20.07.2013
- Domsch, M. (1980): Systemgestützte Personalarbeit. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH.
- Domschke, W.; Scholl, A. (2005): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht; mit 79 Tabellen. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act: An Act to promote the financial stability of the United States by improving accountability and transparency in the financial system, to end "too big to fail", to protect the American taxpayer by ending bailouts, to protect consumers from abusive financial services practices, and for other purposes vom 21.07.2010.
- Drumbl, A. (2012): Ökotraining. Berlin: Epubli GmbH.
- Dubielzig, F. (2009): Sozio-Controlling im Unternehmen. Das Management erfolgsrelevanter sozial-gesellschaftlicher Themen in der Praxis. Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage GmbH.
- Dyckhoff, H.; Souren, R. (2008): Nachhaltige Unternehmensführung. Grundzüge industriellen Umweltmanagements. Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Dyllick, T.; Hockerts, K. (2002): Beyond the business case for corporate sustainability. In: Business Strategy and the Environment 11 (2), S. 130-141.

Economic Commission for Europe (1993): Impact of developments in scrap reclamation and preparation on the world steel industry. Geneva: United Nations.

Egede, P.; Nehuis, F.; Herrmann, C.; Vietor, T. (2014): Integration of eLCAR Guidelines into Vehicle Design. In: R. P. Bajpai, U. Chandrasekhar und A. R. Arankalle (Hg.): Innovative design, analysis and development practices in aerospace and automotive engineering. New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London: Springer India, S. 235-242.

Ehrlenspiel, K. (1980): Möglichkeit zum Senken der Produktkosten. Erkenntnisse aus einer Auswertung von Wertanalysen. In: *Konstruktionslehre* 32 (5), S. 173-178.

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U. (2013): Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung; mit 143 Tabellen. Heidelberg: Springer.

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. (2013): Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5. Auflage. München Wien: Carl Hanser Verlag.

Empacher, C.; Wehling, P. (2002): Soziale Dimension der Nachhaltigkeit. Theoretische Grundlagen und Indikatoren. Frankfurt am Main: Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH.

Enquete-Kommission (1998): Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“. Konzept Nachhaltigkeit - Vom Leitbild zur Umsetzung. Bonn: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH. Online verfügbar unter <http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/13/112/1311200.pdf>, zuletzt geprüft am 24.04.2014.

EUROFER (2015): Scrap price index. Online verfügbar unter [www.eurofer.org/Facts&Figures/ws.res/Scrap\\_PricesIndex.pdf](http://www.eurofer.org/Facts&Figures/ws.res/Scrap_PricesIndex.pdf), zuletzt geprüft am 11.03.2015.

Europäische Kommission, Generaldirektion Beschäftigung und Soziales, Referat EMPL/D.1 (2001): Europäische Rahmenbedingungen für die soziale Verantwortung der Unternehmen. Grünbuch. Luxemburg: Amt für Amtliche Veröffentlichung der Europäischen Gemeinschaften.

eurostat (2015): Strompreise nach Art des Benutzers. Online verfügbar unter [http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do;jsessionid=qljPCd3A1q1RMieriFO1Yz\\_s\\_N4QDqtjapnGL9pfsFAqxSz1aw-7!2040736553?tab=table&plugin=1&pcode=ten00117&language=de](http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do;jsessionid=qljPCd3A1q1RMieriFO1Yz_s_N4QDqtjapnGL9pfsFAqxSz1aw-7!2040736553?tab=table&plugin=1&pcode=ten00117&language=de), zuletzt geprüft am 27.07.2015.

Feldhusen, J.; Grote, H.-H.; Göpfert, J. Tretow, G. (2013a): Technische Systeme. In: J. Feldhusen und K.-H. Grote (Hg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und anwendung erfolgreicher*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 237-282.

Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Nagarajah, A.; Pahl, G.; Beitz, W.; Wartzack, S. (2013b): Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. In: J. Feldhusen und K.-H. Grote (Hg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und anwendung erfolgreicher*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 291-410.

Feldhusen, J.; Schürmann, H.; Orloff, M. (2014): Grundlagen technischer Systeme und des methodischen Vorgehens. In: K.-H. Grote und J. Feldhusen (Hg.): *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. F 1-F 38.

- Feldmann, H.-W. (2006): Workforce productivity. Ganzheitliche Optimierungsstrategien für Human Resources. Erlangen: Hirschenverlag.
- Franke, W. (2002): Zusammenfassung der Ergebnisse. In: S. Wittek, P. H. Feindt, W. Gessenharter, J. Hoppe, E. K. Seifert und H. Spilker (Hg.): Nachhaltigkeitsindikatoren und Partizipation. Hamburg: Hamburg University Press, S. 118-120.
- Frank, K.-P. (1997): Ein dynamischer Ansatz des Target Costings. In: K. Backhaus, B. Günter, M. Kleinaltenkamp, W. Plinke und H. Raffée (Hg.): Marktleistung und Wettbewerb. Strategische und operative Perspektiven der marktorientierten Leistungsgestaltung. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 277–289.
- Frischknecht, R. (2009): Umweltverträgliche Technologien: Analyse und Beurteilung. Teil 2: Ökobilanzen. Vorlesungsskript. ETH Zürich, Zürich. Departement Umweltwissenschaften.
- Gadatsch, A. (2012): Grundkurs Geschäftsprozess-Management. Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis: eine Einführung für Studenten und Praktiker. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien.
- Gahr, A.; Lindemann, U. (2004): Ein methodischer Ansatz zur induzierten Kostenkalkulation individualisierter Produkte. In: H. Meerkamm (Hg.): Design for X. 15. Symposium, Neukirchen 2004. Erlangen: Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl Konstruktionstechnik, S. 159-168.
- Gaiser, B.; Kieninger, M. (1993): Fahrplan für die Einführung des Target Costing. In: P. Horváth (Hg.): Target costing. Marktorientierte Zielkosten in der deutschen Praxis. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 53-74.
- Gausemeier, J.; Frank, U.; Donoth, J.; Kahl, S. (2008): Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus. In: Konstruktion 60 (7/8), S. 59-66.
- Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F. (2001): Produktinnovation. Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. München: Hanser.
- Georges, K. E. (2014): Kleines deutsch-lateinisches Handwörterbuch: Band 2 (L-Z) Neusatz der Ausgabe von 1910. Berlin: Verlag der Contumax GmbH & Co. KG.
- Ghenda, J. T. (2011): 10. CO<sub>2</sub>-Monitoring-Fortschrittsbericht der Stahlindustrie in Deutschland. Berichtsjahr 2010. Online verfügbar unter [http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2014/03/10\\_CO2-Monitoring-Fortschrittsbericht\\_Stahlindustrie\\_2010.pdf](http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2014/03/10_CO2-Monitoring-Fortschrittsbericht_Stahlindustrie_2010.pdf), zuletzt geprüft am 09.03.2015.
- Gleich, R. (1996): Target costing für die montierende Industrie. München: Verlag Vahlen.
- Global Reporting Initiative (2006): Sustainability Reporting Guidelines. Online verfügbar unter <https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/G3-Sustainability-Reporting-Guidelines.pdf>, zuletzt geprüft am 07.10.2015.
- Goedkoop, M. (1995): The Eco-indicator 95. Final Report. Online verfügbar unter [www.pre-sustainability.com/download/EI95FinalReport.pdf](http://www.pre-sustainability.com/download/EI95FinalReport.pdf), zuletzt geprüft am 13.07.2015.
- Goedkoop, M.; Spriensma, R. (2001): The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Online verfügbar unter [www.pre-sustainability.com/download/EI99\\_methodology\\_v3.pdf](http://www.pre-sustainability.com/download/EI99_methodology_v3.pdf), zuletzt geprüft am 13.07.2015.

- Göpfert, I.; Grünert, M. (2012): Logistiknetze der Zukunft – Das neue Hersteller-Zulieferer-Verhältnis in der Automobilindustrie. In: I. Göpfert (Hg.): Logistik der Zukunft. Logistics for the future. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 139-178.
- Gößling-Reisemann, S. (2008): Von der Verschränktheit der Nachhaltigkeits-Dimensionen. In: A. von Gleich und S. Gößling-Reisemann (Hg.): Industrial Ecology. Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag |GWV Fachverlage GmbH, S. 264-270.
- Grabner, J.; Nothhaft, R. (2006): Konstruieren von Pkw-Karosserien. Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftenübersicht, Beispiele mit CATIA V4 und V5. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Gramlich, S. (2013): Vom fertigungsgerechten Konstruieren zum produktionsintegrierenden Entwickeln. Durchgängige Modelle und Methoden im Produktlebenszyklus. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Griesshammer, R.; Buchert, M.; Gensch, C.-O.; Hochfeld, C.; Manhart, A.; Ruedenauer, I. (2007): PROSA – Product Sustainability Assessment. Beschreibung der Methode. Freiburg. Online verfügbar unter [http://prosa.org/fileadmin/user\\_upload/pdf/PROSA-gesamt\\_Finalversion\\_0407\\_red.pdf](http://prosa.org/fileadmin/user_upload/pdf/PROSA-gesamt_Finalversion_0407_red.pdf), zuletzt geprüft am 09.09.2014.
- Griesshammer, R.; Buchert, M.; Gensch, C.-O.; Hochfeld, C.; Ruedenauer, I.; Ebinger, F. (2004): PROSA - Klartext zur sozialen und gesellschaftliche Dimension von Produkten. In: Umweltwirtschaftsforum 12 (1), S. 42-46.
- Groche, P.; Hohmann, J.; Kessler, T.; Schreiner, J.; Krech, M.; Duschka, A. et al. (2015): Industrie 4.0 - Forschung am PtU. In: P. Groche (Hg.): 12. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt. »Industrie 4.0 in der Umformtechnik«. Bamberg: Meisenbach Verlag GmbH, S. 27-47.
- Gruden, D. (2008): Umweltschutz in der Automobilindustrie. Motor, Kraftstoffe, Recycling: mit 305 Abbildungen und 16 Tabellen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH.
- Grüner, C. (2001): Die strategiebasierte Entwicklung umweltgerechter Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Grunwald, A.; Kopfmüller, J. (2006): Nachhaltigkeit. Frankfurt am Main: Campus-Verlag GmbH.
- Hamm, C. (2015): Betreff: AW: VW [GroupMail]. Darmstadt, 30.03.2015. E-Mail an Marko Ćorić.
- Hanusch, D.; Birkhofer, H. (2008): Gesellschaftliche Nachhaltigkeit von Produkten – Verantwortung und Einfluss seitens der Produktentwicklung. In: K. Brökel, J. Feldhusen, K.-H. Grote, F. Rieg und R. Stelzer (Hg.): Nachhaltige und effiziente Produktentwicklung. 6. gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2008. Aachen: Shaker Verlag GmbH, S. 211-220.
- Hanusch, D. (2011): Die Entwicklung nachhaltiger Produkte – theoretischer Anspruch und Möglichkeiten zur praktischen Umsetzung in der sozialen Dimension. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Hardke, A. (2010): Das CSR-Universum. In: A. Hardtke und A. Kleinfeld (Hg.): Gesellschaftliche Verantwortung von Unternehmen. Von der Idee der Corporate Social Responsibility zur erfolgreichen Umsetzung: Gabler Verlag, S. 16-70.

- Hardt, C. (2011): Rohstoffpreisrisikomanagement in industriellen Supply Chains. Dargestellt am Beispiel der Automobilindustrie. Lohmar – Köln: JOSEF EUL VERLAG GmbH.
- Healy, T.; Côté, S.; Helliwell, J.; Field, S. (2001): The well-being of nations. The role of human and social capital. Paris: Organisation for Economic Cooperation and Development.
- Hediger, W. (1999): Reconciling “weak” and “strong” sustainability”. In: International Journal of Social Economics 26 (7/8/9), S. 1120-1144.
- Heesen, B.; Gruber, W. (2014): Bilanzanalyse und Kennzahlen. Fallorientierte Bilanzoptimierung. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Heidemann, B. (2001): Trennende Verknüpfung. Ein Prozessmodell als Quelle für Produktideen. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Herdzina, K.; Seiter, S. (2011): Einführung in die Mikroökonomik. München: Franz Vahlen.
- Hicks, J. (1946): Value and capital. An inquiry into some fundamental principles of economic theory. Oxford: Clarendon Press.
- Hildebrandt, E. (2002): Arbeit und Nachhaltigkeit. WZB Discussion Paper, No. P 99-502. Online verfügbar unter <https://www.econstor.eu/dspace/bitstream/10419/50285/1/27111357X.pdf>, zuletzt geprüft am 22.01.2015.
- Hildebrandt, E. (2003): Arbeit und Nachhaltigkeit. Wie geht das zusammen? In: G. Linne und M. Schwarz (Hg.): Handbuch nachhaltige Entwicklung. Wie ist nachhaltiges Wirtschaften machbar? Opladen: Leske + Budrich, S. 381-393.
- Hilfrich, E.; Maas, J.; Flöth, T. (2007): Türenbenchmark – Vergleich und Optimierung von Fahrzeugtüren. In: ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift 109 (06), S. 522-529.
- Hinterberg, F.; Moll, S.; Femina, A. (1998): Arbeitsproduktivität, Ressourcenproduktivität und Ressourcenintensität der Arbeit. Makroökonomische und sektorale Analyse. Hg. v. Institut Arbeit und Technik. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Gelsenkirchen.
- Hirsch, S. (1967): Location of industry and international competitiveness. Oxford: Oxford University Press.
- Hirth, T.; Ziegahn, K.-F.; Schubert, H. (2001): Produkte und Prozesse mit dem Ziel Nachhaltigkeit. In: Gesellschaft für Umweltsimulation (Hg.): Umwelteinflüsse erfassen, simulieren, bewerten. 21. bis 23. März 2001, Festhalle Stutensee-Blankenloch bei Karlsruhe. Pfnztal: Gesellschaft für Umweltsimulation, S. 2.1-2.9.
- Hofstetter, P. (1998): Perspectives in Life Cycle Impact Assessment. A Structured Approach to Combine Models of the Technosphere, Ecosphere and Valuesphere. Boston, MA USA: Kluwer Academic Publishers Groupe.
- Horsch, J. (2010): Kostenrechnung. Klassische und neue Methoden in der Unternehmenspraxis. Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage GmbH.
- Horváth, P.; Niemand, S.; Wohlbold, M. (1993): Target Costing. State of the Art. In: P. Horváth (Hg.): Target costing. Marktorientierte Zielkosten in der deutschen Praxis. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 3-27.
- Horváth, P. (Hg.) (1993): Target costing. Marktorientierte Zielkosten in der deutschen Praxis. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Hubka, V. (1973): Theorie der Maschinensysteme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer.

Hubka, V. (1976): Theorie der Konstruktionsprozesse. Analyse der Konstruktionstätigkeit. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.

Hubka, V. (1984): Theorie technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre. Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer-Verlag.

Huggett, R. J. (1999): Ecosphere, biosphere, or Gaia? What to call the global ecosystem. In: *Global Ecology and Biogeography* 8 (6), S. 425-431.

Ignatowitz, E. (2011): Werkstofftechnik für Metallbauberufe. Mit Eigenschafts- und Maßstabellen sowie Bearbeitungsrichtwerten für Werkstoffe – Halbzeuge – Normteile – Hilfsstoffe – Bauteile. Haan-Grüten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer. Online verfügbar unter [http://www.christiani.de/product\\_info.php/cPath/80\\_81\\_82\\_1305\\_1349/products\\_id/10787](http://www.christiani.de/product_info.php/cPath/80_81_82_1305_1349/products_id/10787).

InfoMine (2015a): Historical Coal Prices and Price Chart. Online verfügbar unter <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/coal/all/>, zuletzt geprüft am 27.07.2015.

InfoMine (2015b): Historical Crude Oil Prices and Price Chart. Online verfügbar unter <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/crude-oil/all/>, zuletzt geprüft am 27.07.2015.

InfoMine (2015c): Historical Iron Ore Fines Prices and Price Chart. Online verfügbar unter <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/crude-oil/all/>, zuletzt geprüft am 27.07.2015.

InsO: Insolvenzordnung vom 15.07.2013.

IPCC (1990): Climate change. The IPCC scientific assessment. Reprinted. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC (2007): Climate change 2007. The physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press.

Ishioka, M.; Yasuda, K. (2009): Product Development Concept with Product Sustainability. In: PICMET 2009 Proceedings, August 2-6, Portland, Oregon USA, S. 1699-1706.

ISO/TR 14047 (2012): Environmental management – Life cycle impact assessment – Examples of application of ISO 14042.

Jäger, J. (2007): Was verträgt unsere Erde noch? Wege in die Nachhaltigkeit. Frankfurt am Main: Fischer-Taschenbuch-Verlag.

Janz, A.; Schmid-Unterseh, T. (2013): Das „vorgezogene“ Ende der Abfalleigenschaft von Schrotten – Ein Beitrag zur Steigerung der Ressourcenproduktivität durch Abfallwirtschaft? In: B. Bilitewski, H. Schnurer, B. Zeschmar-Lahl und P. Quicker (Hg.): Müll-Handbuch. Sammlung und Transport, Behandlung und Ablagerung sowie Vermeidung und Verwertung von Abfällen: ergänzbares Handbuch für die kommunale und industrielle Abfallwirtschaft. Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, S. 0184.

Joos-Sachse, T. (2006): Controlling, Kostenrechnung und Kostenmanagement. Grundlagen – Instrumente – neue Ansätze. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH.

- Kaminski, G. (1973): Chinesische Positionen zum Völkerrecht. Berlin: Duncker & Humblot.
- Kano, N.; Seraku, F.; Takahashi, F.; Tsuji, S. (1984): Attractive quality and Must-be quality. In: The Journal of the Japanese Society for Quality Control 14 (2), S. 147-156.
- Kassas, M. (1987): The Three Systems of Mankind. In: Environmental Policy and Law 17 (3-4), S. 119-128.
- Kesselring, F. (1954): Technische Kompositionslehre. Anleitung zu technisch-wirtschaftlichem und verantwortungsbewussten Schaffen. Berlin Göttingen Heidelberg: Springer-Verlag OHG.
- Kiener, S.; Maier-Scheubeck, N.; Obermaier, R.; Weiß, M. (2009): Produktions-Management. Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Kilger, W.; Pampel, J. R.; Vikas, K. (2012): Flexible Plankostenrechnung und Deckungsbeitragsrechnung. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Kirchner, Eckhard (2007): Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben: Grundlagen der Auslegung, Entwicklung und Validierung von Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Kleine, A. (2009): Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsstrategie. Ökologie, Ökonomie und Soziales integrieren. Wiesbaden: Gabler.
- Kleinschmidt, E.; Geschka, H.; Cooper, R. G. (1996): Erfolgsfaktor Markt. Kundenorientierte Produktinnovation. Berlin: Springer.
- Kloepffer, W. (2008): Life Cycle Sustainability Assessment of Products. with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 13 (2), S. 89-95.
- Kloepffer, W.; Grahl, B. (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Klöpffer, W. (2003): Life-Cycle based methods for sustainable product development. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 8 (3), S. 157-159.
- Klug, F. (2010): Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kneer, G.; Kilian, B. (2000): Soziale Nachhaltigkeit. Eine Stellungnahme zum Beitrag „Die soziale Dimension in der Nachhaltigkeit von Kilian Bizer“. In: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung 13 (3/4), S. 493-500.
- Kneppe, G. (2012): Herstellung von Warmband. In: H. Hoffmann, R. Neugebauer und G. Spur (Hg.): Handbuch Umformen. München: Carl Hanser Verlag, S. 135-152.
- Koch, S. (2011): Einführung in das Management von Geschäftsprozessen. Six Sigma, Kaizen und TQM. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Koller, R. (1985): Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen d. method. Konstruierens. Berlin Heidelberg New York Tokyo: Springer Verlag.
- Koller, R.; Kastrup, N. (1994): Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.

- Kopfmüller, J. (2007): Auf dem Weg zu einem integrativen Nachhaltigkeitkonzept. Die Verbindung von Umwelt und Entwicklung im Nachhaltigkeitsdiskurs. In: *Ökologisches Wirtschaften* (1), S. 16-18.
- Koplin, J. (2006): Nachhaltigkeit im Beschaffungsmanagement. Ein Konzept zur Integration von Umwelt- und Sozialstandards. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlag GmbH.
- Kosiol, E. (1968): Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Die Unternehmung als wirtschaftliches Aktionszentrum. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH.
- Kosmol, J.; Kanthake, J.; Hermann, F.; Golde, M.; Alsleben, C.; Penn-Bressel, G.; Schmitz, S.; Gromke, U. (2012): Glossar zum Ressourcenschutz. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf>, zuletzt geprüft am 27.07.2015.
- Kramer, F. (1998): Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Grundlagen – Komponenten – Systeme. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Kraus, W. (2007): Grundsätzliche Aspekte des Automobildesign. In: H. Braess; U. Seifert (Hg.): *Automobil design und Technik. Formgebung, Funktionalität, Technik*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlag GmbH, S. 30-65.
- KrWG: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen vom 24.02.2012.
- Kurz, U.; Hintzen, H.; Laufenberg, H. (2009): Konstruieren, Gestalten, Entwerfen. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium der Konstruktionstechnik. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Landrock, H. (2009): Nur anschauen – nicht tasten. Weshalb optische Scanner Koordinaten-Messmaschinen mit Tastköpfen übertrumpfen. In: *CAD CAM* 9 (10), S. 16-18.
- Langer, G. (2011): Unternehmen und Nachhaltigkeit. Analyse und Weiterentwicklung aus der Perspektive der wissensbasierten Theorie der Unternehmung. Wiesbaden: Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Lang-Koetz, K.; Heubach, D.; Beucker, S. (2006): Abschätzung von Umweltwirkungen in frühen Phasen des Produktinnovationsprozesses. In: R. Pfriem, R. Antes, K. Fichter, M. Müller, N. Peach, S. Seuring und B. Siebenhüner (Hg.): *Innovationen für eine nachhaltige Entwicklung*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH, S. 417-432.
- Läpple, V. (2010): *Werkstofftechnik Maschinenbau. Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen*. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG.
- Lause, F. (2012): Wissenschaft und Ethik. Online verfügbar unter [https://ekvv.uni-bielefeld.de/kvv\\_publ/publ/vd%3Bjsessionid=1CDAA5ED140B0AA98052E4FE80C20BCA.publ\\_ekvvb?id=33069703&toggleTerminAnzeige=X](https://ekvv.uni-bielefeld.de/kvv_publ/publ/vd%3Bjsessionid=1CDAA5ED140B0AA98052E4FE80C20BCA.publ_ekvvb?id=33069703&toggleTerminAnzeige=X), zuletzt geprüft am 03.02.2015.
- Lehrke, G. (2003): Streiks nach Massenkündigung, Betriebsrat wird ausgesperrt. *Alba-Arbeiter: Man behandelt uns wie Müll*. Online verfügbar unter <http://www.berliner-kurier.de/archiv/streiks-nach-massenkuendigung--betriebsrat-wird-ausgesperrt-alba-arbeiter--man-behandelt-uns-wie-muell,8259702,4213314.html>, zuletzt geprüft am 12.05.2015.

- Leinscheid, B. (2000): Ist eine leitbildkonforme Operationalisierung sozialer Nachhaltigkeit möglich? In: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung 13.2000 (3/4), S. 501-506.
- Liesegang, D. G. (1993): Reduktionswirtschaft als Komponente zur Produktionswirtschaft – eine globale Notwendigkeit. In: M. Haller, E. Bracuhlin, R. Wunderer, K. Bleicher, H.-J. Pleitner und A. Zünd (Hg.): Globalisierung der Wirtschaft – Einwirkungen auf die Betriebswirtschaftslehre. 54. Wissenschaftliche Jahrestagung des Verbandes der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V. vom 9. - 13. Juni in St. Gallen 1992 in St. Gallen. Bern Stuttgart Wien: Verlag Paul Haupt, S. 383-395.
- Lindemann, U. (2007): Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. Berlin: Springer.
- Loew, T.; Ankele, K.; Braun, S.; Clausen, J. (2004): Bedeutung der internationalen CSR-Diskussion für Nachhaltigkeit und die sich daraus ergebenden Anforderungen an Unternehmen mit Fokus Berichterstattung. Endbericht. Münster Berlin. Online verfügbar unter [http://www.upj.de/fileadmin/user\\_upload/MAIN-dateien/Themen/Einfuehrung/ioew\\_csr\\_diskussion\\_2004.pdf](http://www.upj.de/fileadmin/user_upload/MAIN-dateien/Themen/Einfuehrung/ioew_csr_diskussion_2004.pdf), zuletzt geprüft am 27.11.2014.
- Luttrupp, C.; Lagerstedt, J. (2006): EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. In: Journal of Cleaner Production 14 (15-16), S. 1396-1408.
- Lutz-Kunisch, B. (2008): Partielle Lösungen für eine nachhaltige Entwicklung industrieller Systeme. In: A. von Gleich und S. Gößling-Reisemann (Hg.): Industrial Ecology. Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag |GWV Fachverlage GmbH, S. 59-67.
- Malik, K. (2014): Human Development Report 2014. Sustaining Human Progress: Reducing Vulnerabilities and Building Resilience. New York, NY USA: United Nations Development Programme.
- Marincek, B. (1964): Stoff- und Wärmeumsatz metallurgischer Vorgänge. Berlin Göttingen Heidelberg: Springer Verlag OHG.
- Martens, H. (2011): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Mathewis, D.; Pawelski, H. (2012): Herstellung von Kaltband. In: H. Hoffmann, R. Neugebauer und G. Spur (Hg.): Handbuch Umformen. München: Carl Hanser Verlag, S. 153-162.
- Maxwell, D.; Sheate, W.; van der Vorst, Rita (2003): Sustainable Innovation in Product and Service Development. In: Journal of Cleaner Production 11 (8), S. 883-895.
- McLennan, J. (2004): The philosophy of sustainable design. The future of architecture. Kansas City, Mo.: Ecotone.
- Mengel, J.; Young, D.; Glaser, G.; Symon, C. (Hg.) (2015): Review of the Sustainable Development Goals: The Science Perspective. Paris: International Council for Science.
- Meyer, H. (1983): Recyclingorientierte Produktgestaltung. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Mittal, B. (1988): The role of affective choice mode in the consumer purchase of expressive products. In: Journal of Economic Psychology 9 (4), S. 499-524.

- Mitteldeutsche Zeitung (2003): Umweltschutz. Dosenpfand kostet Jobs in Getränkeindustrie. Online verfügbar unter <http://www.mz-web.de/wirtschaft/umweltschutz-dosenpfand-kostet-jobs-in-getraenkeindustrie,20642182,19671752.html>, zuletzt geprüft am 15.05.2015.
- Mohr, H. (1997): Wissen als Humanressource. In: G. Clar (Hg.): Humankapital und Wissen. Grundlagen einer nachhaltigen Entwicklung: mit 22 Tabellen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 13-27.
- Möller, H. P.; Hüfner, B.; Ketteniß, H. (2011): Internes Rechnungswesen. Berlin Dordrecht London New York: Springer-Verlag.
- Mörtl, M. (2012): Kostenrechnung in der Konstruktion. In: F. Rieg und R. Steinhilper (Hg.): Handbuch Konstruktion. München Wien: Carl Hanser Verlag, S. 707-724.
- Müller, A. (2012): Ansätze und Instrumente des Nachhaltigkeitscontrollings. Ein praxisorientierter Überblick. In: R. Gleich, P. Bartels und V. Breisig (Hg.): Nachhaltigkeitscontrolling. Konzepte, Instrumente und Fallbeispiele zur Umsetzung. Freiburg München: Haufe-Lexware GmbH & Co. KG, S. 45-90.
- Müller, E. (2002): Der Stellenwert sozialer Themen in der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. In: Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend (Hg.): Zivilgesellschaft und soziale Nachhaltigkeit. Forum zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. Berlin: Bank für Sozialwirtschaft, S. 13-19.
- Müller, G. (2001): China, Kropotkin und der Anarchismus. Eine Kulturbewegung im China des frühen 20. Jahrhunderts unter dem Einfluss des Westens und japanischer Vorbilder. Wiesbaden: Otto Harrassowitz.
- Müller, H. (1991): Industrielle Abfallbewältigung. Entscheidungsprobleme aus betriebswirtschaftlicher Sicht. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH.
- Müller, K.; Brandt, R.; Grüner, C. (2000): Umweltbezogene Konstruktionsstrategien. In: H. Birkhofer (Hg.): Umweltgerechte Produktentwicklung. Ein Leitfaden für Entwicklung und Konstruktion,. Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH, Kapitel 3.2/S. 1-Kapitel 3.2.3/S. 4.
- Müller, M.; Schneidewind, U. (2008): Symbole und Substanzen – Chancen und Grenzen der Steuerung von Stoffströmen. In: A. von Gleich und S. Gößling-Reisemann (Hg.): Industrial Ecology. Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag |GWV Fachverlage GmbH, S. 170-179.
- Müller-Christ, G. (2001): Umweltmanagement. Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung. München: Vahlen.
- Nasr, N.; Thurston, M. (2006): Remanufacturing: A Key Enabler to Sustainable Product Systems. In: Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, S. 15-18.
- Negele, H. (2014): Systemtechnische Methodik zur ganzheitlichen Modellierung am Beispiel der integrierten Produktentwicklung. München: Utz Verlag GmbH.
- Neugebauer, S.; Finkbeiner, M. (2012): Ökobilanz nach ISO 14040/44 für das Multirecycling von Stahl. Online verfügbar unter [http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/20120621\\_Bericht\\_Multi-Recycling-Ansatz\\_Stahl-final.pdf](http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/20120621_Bericht_Multi-Recycling-Ansatz_Stahl-final.pdf), zuletzt geprüft am 20.10.2014.

- Neumann, B. (1939): Lehrbuch der Chemischen Technologie und Metallurgie. Brennstoffe Anorganische Industriezweige. Berlin: Verlag von Julius Springer.
- Niemann, J. (2009): Life Cycle Management – Das Paradigma der ganzheitlichen Produktlebenslaufbetrachtung. In: H.-J. Bullinger, D. Spath, H.-J. Warnecke und E. Westkämper (Hg.): Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 224-235.
- o. V. (1981): Meyers grosses Universallexikon, Band 4. Mannheim: Bibliographisches Institut.
- o. V. (1998a): Schrottaufbereitung. In: Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (Hg.): Fachbuch Stahlrecycling; vom Rohstoff Schrott zum Stahl. München-Gräfelfing: Reed Elsevier Deutschland GmbH, S. 8/1-8/49.
- o. V. (1998b): Stahlerzeugungsverfahren. In: Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (Hg.): Fachbuch Stahlrecycling; vom Rohstoff Schrott zum Stahl. München-Gräfelfing: Reed Elsevier Deutschland GmbH, S. 13/1-13/16.
- o. V. (2006): Die amtliche Regelung der deutschen Rechtschreibung. Online verfügbar unter [http://www.duden.de/sites/default/files/downloads/amtliche\\_Regelungen.pdf](http://www.duden.de/sites/default/files/downloads/amtliche_Regelungen.pdf), zuletzt geprüft am 24.11.2015.
- OECD (2000): Towards Sustainable Development. Indicators to measure Progress. Online verfügbar unter <http://www.oecd.org/site/worldforum/33703694.pdf>, zuletzt geprüft am 21.11.2014.
- OECD (2014): Society at a Glance 2014. OECD social indicators. Paris: OECD Publishing.
- Omann, I.; Spangenberg, J. (2002): Assessing Social Sustainability. The Social Dimension of Sustainability in a Socio-Economic Scenario. In: Präsentiert in 7th Biennial Conference of the International Society for Ecological Economics in Sousse (Tunisia), 6-9 March 2002.
- Ossadnik, W. (2008): Kosten- und Leistungsrechnung. Berlin: Springer-Verlag.
- Ott, A. F. (2015): Mitarbeiter des Presswerkes, 23.03.2015. E-Mail an Marko Ćorić.
- Otto, S. (2007): Bedeutung und Verwendung der Begriffe nachhaltige Entwicklung und Nachhaltigkeit. Eine empirische Studie. Dissertation. Jacobs University Bremen, Bremen. Jacobs Center on Lifelong Learning and Institutional Development.
- Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2007): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2005): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag.
- Pant, R.; Atik, A. (2000): Methode der Materialintensität pro Serviceeinheit (MIPS). In: H. Birkhofer (Hg.): Umweltgerechte Produktentwicklung. Ein Leitfaden für Entwicklung und Konstruktion. Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH, Kapitel 3.3.4/S. 1-Kapitel 3.3.4 S. 5.

- PartsCats.info (2015): Volkswagen Teilekatalog. Online verfügbar unter <http://www.partscats.info/volkswagen/en/img/vw/412/412145650.png>, zuletzt geprüft am 20.07.2015.
- Pastewski, N. (2009): Einsatz neuer Technologien zur ressourceneffizienzorientierten Produktoptimierung. In: S. Feifel, W. Walk, Si. Wursthorn und L. Schebek (Hg.): Ökobilanzierung 2009 – Ansätze und Weiterentwicklungen zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit. Tagungsband Ökobilanz-Werkstatt 2009, Campus Weihenstephan, Freising, 5. bis 7. Oktober 2009. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, S. 185-192.
- Patzak, G. (1982): Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin New York: Springer-Verlag.
- Petersen, F. (2009): Entwicklungen des Kreislaufwirtschaftsrechts. Die neue Abfallrahmenrichtlinie – Auswirkungen auf das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. In: Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (17), S. 1063-1072.
- Petersen, M.; Brockhaus, S.; Kersten, W. (2015): Nachhaltigkeit als Zieldimension in der Entwicklung von Konsumgütern. In: Fraunhofer IAO Stuttgart, Universität Stuttgart I.M.A., IKTD Universität Stuttgart und Dieter Spath, Hansgeorg Binz, Bernd Bertsche (Hg.): Entwicklung smarterer Produkte für die Zukunft. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2015. Stuttgart, 18.06.2015: Fraunhofer Verlag, S. 1-10.
- Pfeiffer, W.; Bischof, P. (1974): Produktlebenszyklen als Basis der Unternehmensplanung. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft 44 (10), S. 635-666.
- Pilarsky, G. (2014): Wirtschaft am Rohstoffropf. Der Kampf um die wichtigsten mineralischen Ressourcen. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Platts-McGraw Hill Financial (2011): Deutschland: Mangel an Neuschrott wegen Erdbeben in Japan. Online verfügbar unter [https://www.steelbb.com/de/?PageID=157&article\\_id=92803](https://www.steelbb.com/de/?PageID=157&article_id=92803), zuletzt geprüft am 23.06.2015.
- Plinke, W.; Rese, M. (2006): Industrielle Kostenrechnung. Eine Einführung. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Pliskat, J. (2014): Effizienz im Presswerk. Online verfügbar unter <http://www.industry.siemens.com/topics/global/de/magazine/advance/industrielle-schalttechnik/seiten/effizienz-im-presswerk.aspx>, zuletzt geprüft am 30.03.2015.
- Pohl, K.-H. (2009): Zur Universalität und Relativität von Ethik und Menschenrechten im Dialog mit China. In: B. von Hoffmann (Hg.): Universalität der Menschenrechte. Kulturelle Pluralität. Frankfurt am Main: Peter Lang GmbH, S. 117–136.
- Pólya, G. (1971): How to solve it. A new aspect of mathematical method. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Pommerening, T. (2005): Gesellschaftliche Verantwortung von Unternehmen. Eine Abgrenzung der Konzepte Corporate Social Responsibility (CSR) und Corporate Citizenship (CC). Online verfügbar unter [http://fumzvrw.upj.de/fileadmin/user\\_upload/MAIN-dateien/Infopool/Forschung/pommerening\\_thilo.pdf](http://fumzvrw.upj.de/fileadmin/user_upload/MAIN-dateien/Infopool/Forschung/pommerening_thilo.pdf), zuletzt geprüft am 22.04.2014.
- Ponn, J.; Lindemann, U. (2008): Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Optimierte Produkte – systematisch von Anforderungen zu Konzepten. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Ponn, J.; Lindemann, U. (2011): Konzeptentwicklung und Gestaltung Technischer Produkte. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer.

- Posluschny, P. (2010): Basiswissen Mittelstandscontrolling. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Prammer, H. K. (2009): Integriertes Umweltkostenmanagement. Bezugsrahmen und Konzeption für eine ökologisch nachhaltige Unternehmensführung. Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage GmbH.
- Pufé, Iris (2012a): Nachhaltigkeit. Konstanz München: UVK Verlagsgesellschaft mbH.
- Pufé, Iris (2012b): Nachhaltigkeitsmanagement. München: Carl Hanser Verlag.
- Putnam, R. D. (1995): Tuning In, Tuning Out: The Strange Disappearance of Social Capital in America. In: PS: Political Science and Politics 28 (4), S. 664-683.
- Putnam, R. D.; Goss, K. A. (2001): Einleitung. In: R. D. Putnam (Hg.): Gesellschaft und Gemeinsinn. Sozialkapital im internationalen Vergleich. Gütersloh: Verlag Bertelsmann Stiftung, S. 15-44.
- Quirnbach, O. (2001): Integration der System- und Kostenentwicklung am Beispiel eines Satellitensystems. München: Herbert Utz Verlag GmbH.
- Radermacher, F. J. (1998): Zukunft der Arbeit. In: zum nachdenken, S. 3-18.
- Raff, T. (2000): Systemgeschäft und Integralqualitäten: Informationsökonomische Fundierung und empirische Prüfung am Beispiel der Fertigungsautomatisierung. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Rat für Nachhaltige Entwicklung (2004): Momentaufnahme Nachhaltigkeit und Gesellschaft. Bericht. Berlin: Rat für Nachhaltige Entwicklung.
- Rath, K. (2014): Energieeffizienz ganzheitlich betrachtet. Eine modellbasierte Entwicklungsmethodik zur gezielten Optimierung des Energieinputs von technischen Systemen. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- REACH-Verordnung: Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe vom 30.12.2006.
- Redlich, T. (2011): Wertschöpfung in der Bottom-up-Ökonomie. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer.
- REFA (1973): Methodenlehre des Arbeitsstudiums. Teil 3: Kostenrechnung, Arbeitsgestaltung. München: Carl Hanser Verlag.
- REFA (1976a): Methodenlehre des Arbeitsstudiums. Teil 3: Kostenrechnung, Arbeitsgestaltung. 6. Aufl., 151. - 187. Tsd. München: Carl Hanser.
- REFA (1976b): Methodenlehre des Arbeitsstudiums. Teil 1: Grundlagen. München: Carl Hanser Verlag.
- REFA (1992): Methodenlehre des Arbeitsstudiums. Teil 2: Datenermittlung. München: Carl Hanser Verlag.
- Rehkopf, S. (2006): Revenue-Management-Konzepte zur Auftragsannahme bei kundenindividueller Produktion. Am Beispiel der Eisen und Stahl erzeugenden Industrie. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlag GmbH.
- Reinicke, T. (2004): Möglichkeiten und Grenzen der Nutzerintegration in der Produktentwicklung. Eine Systematik zur Anpassung von Methoden zur Nutzerintegration. München: Verlag Dr. Hut.

- Riess, B.; Peters, A. (2006): Die gesellschaftliche Verantwortung von Unternehmen. Detailauswertung – Dokumentation der Ergebnisse einer Unternehmensbefragung der Bertelsmann Stiftung. Hg. v. Bertelsmann Stiftung. Gütersloh.
- Ritthoff, M.; Rohn, H.; Liedtke, C. (2002): MIPS berechnen. Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.
- Rodenacker, W. G. (1991): Methodisches Konstruieren. Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele. Berlin Heidelberg NewYork London Paris Tokyo Hong Kong Barcelona Budapest: Springer-Verlag.
- Rogall, H. (2002): Ökologische Ökonomie. Eine Einführung. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften | GWV Fachverlage GmbH.
- Rogall, H. (2006): Volkswirtschaftslehre für Sozialwissenschaftler. Eine Einführung. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften | GWV Fachverlage GmbH.
- Rohn, H.; Pastewski, N.; Lettenmeier, M. (2010): Ressourceneffizienz von ausgewählten Technologien, Produkten und Strategien. Meilensteine aus dem Arbeitspaket 1 des MaRess-Projekts. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal.
- Ropohl, G. (2009): Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe.
- Rosemann, B. (2012): Spanende Fertigung. In: F. Rieg und R. Steinhilper (Hg.): Handbuch Konstruktion. München Wien: Carl Hanser Verlag, S. 1003-1048.
- Roters, V. (2008): Heumarkt. Wirbel um Kindersklavenarbeit. Online verfügbar unter <http://www.express.de/koeln/heumarkt-wirbel-um-kinder-sklavenarbeit,2856,710772.html>, zuletzt geprüft am 02.06.2015.
- Roth, K. (2000): Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre. Berlin Heidelberg NewYork: Springer-Verlag.
- Rs. C-9/00-„Palin Granit“: Fall C-9/00 Palin Grantt Oy und Vehmassalon kansanterveysystyön kuntayhtymän hallitus.
- Rüdenauer, I.; Ebinger, F.; Gießhammer, R. (2002): Synopse und Auswertung von Methoden für PROSA. Internes Arbeitspapier. Öko-Institut e.V.
- Sarnes, J.; Kloberdanz, H. (2013): Parts are Part of the Problem – Structuring the Problems in and Needs for EcoDesign of Components. In: Proceedings of the 8th Ecodesign 2013. International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Jeju, Korea, 4.12.2013. Seoul: Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), S. n. b.
- Sauer, T. (2006): Ein Konzept zur Nutzung von Lösungsobjekten für die Produktentwicklung in Lern- und Anwendungssystemen. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Schabacker, M.; Vajna, S. (2014): Wirtschaftlichkeitsaspekte im IDE. In: S. Vajna (Hg.): Integrated Design Engineering. Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, S. 539-562.
- Schabelon, T. (2013): Dosenpfand. Wie Kioske mit "Export"-Dosen beim Pfand tricksen. Online verfügbar unter <http://www.derwesten.de/staedte/essen/wenn-beim-dosenkauf-mit-dem-pfand-getrickst-wird-id8658346.html>, zuletzt geprüft am 12.05.2015.

- Schäfer, P.; Apostolov, H. (2014): Nachhaltige Produktentwicklung. In: M. Eigner, D. Roubanov und R. Zafirov (Hg.): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 369-392.
- Schenk, M. (1998): Altautomobilrecycling. Technisch-ökonomische Zusammenhänge und wirtschaftspolitische Implikationen. Wiesbaden: Gabler Verlag, Deutscher Universitäts-Verlag.
- Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E. (2014): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schimmelpfeng, L. (1999): Ökologische Produktgestaltung. Stoffstromanalysen und Ökobilanzen als Instrumente der Beurteilung: mit 14 Tabellen. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag.
- Schindler, V. (2014): Kraftfahrzeugtechnik. In: K.-H. Grote und J. Feldhusen (Hg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. Q2-Q36.
- Schink, A. (2012): Der Abfallbegriff im Kreislaufwirtschaftsgesetz. In: UPR (6), S. 201-209.
- Schink, A.; Frenz, W.; Queitsch, P. (2012): Das neue Kreislaufwirtschaftsgesetz 2012. Heidelberg, München, Landsberg, Frechen, Hamburg: Hüthig Jehle Rehm GmbH.
- Schlink, H. (2014): Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. Grundlagen für die Entwicklung technischer Produkte. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Schmidt, H.; Di Lorenzo, G. (2012): Verstehen Sie das, Herr Schmidt? Köln: Kiepenheuer & Witsch.
- Schmidt, H.; Die Zeit (2015): Helmut Schmidt. Seine besten Zeit-Artikel: Zeit E-Book.
- Schmidt, I.; Meurer, M.; Saling, P.; Kicherer, A.; Reuter, W.; Gensch, C.-O. (2004): SEEbalance®. Managing Sustainability of Products and Processes with the Socio-Eco-Efficiency Analysis by BASF. In: Greener Management International 45, S. 79-94.
- Schmidt-Bleek, F.; Bringezu, S.; Hindenberg, F.; Liedtke, C.; Spangenberg, J.; Stiller, Hartmut; W., Maria J.(1998): MAIA. Einführung in die Material-Intensitäts-Analyse nach dem MIPS-Konzept. Berlin Basel Boston: Birkhäuser Verlag.
- Schmidt-Bleek, F.; Klüting, R. (1993): Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS - Das Maß für ökologisches Wirtschaften. Berlin Basel Boston: Birkhäuser Verlag.
- Schmitz, A.; Kopp, R. (1995): Wiedereinsatz von entschichteten Blechen in der Fertigung. In: J. Schmidt und R. Leithner (Hg.): Stoffliche, rohstoffliche und thermische Verwertung bei Automobilproduktion und Altautorecycling. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 129-140.
- Schneider, H. (1992): Management werkstofforientierter Innovationen. Ein theoretisch-konzeptioneller Ansatz zur Erklärung und Ausgestaltung einer strategischen Vorsteuerung. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Schoner, P. (2008): Operative Produktionsplanung in der verfahrenstechnischen Industrie. Kassel: Kassel university press GmbH.
- Schulz, W. F.; Burschel, C.; Weigert, M.; Liedtke, C.; Bohnet-Joschko, S.; Kreeb, M. et al. (2001): Lexikon Nachhaltiges Wirtschaften. München: Oldenbourg Verlag.

- Schwarzer, C. M. (2014): Kraftstoffverbrauch. 3,8 Liter? Nie im Leben! Online verfügbar unter <http://www.zeit.de/mobilitaet/2014-09/auto-benzinverbrauch-abweichung>, zuletzt geprüft am 16.04.2015.
- Schweitzer, M.; Küpper, H.-U. (2011): Systeme der Kosten- und Erlösrechnung. München: Vahlen.
- Schwerk, A. (2012): Strategische Einbettung von CSR in das Unternehmen. In: A. Schneider und R. Schmidpeter (Hg.): Corporate Social Responsibility. Verantwortungsvolle Unternehmensführung in Theorie und Praxis. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 331-356.
- Seidenschwarz, W. (1993): Target-Costing. durch marktgerechte Produkte zu operativer Effizienz oder: Wenn der Markt das Unternehmen steuert. In: P. Horváth (Hg.): Target costing. Marktorientierte Zielkosten in der deutschen Praxis. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 28-52.
- Seitz, A. (2003): Entwicklungsbegleitende Ökobilanzierung. In: H. Meerkamm (Hg.): Design for X. Beiträge zum 14. Symposium, Neukirchen, 13. und 14. Oktober 2003. Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, S. 59-68.
- Sen, A.; Anand, S. (1994): Human Development Index: Methodology and Measurement. Online verfügbar unter [hdr.undp.org/sites/default/files/oc12.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/oc12.pdf), zuletzt geprüft am 01.07.2015.
- Smith, A. (1981): An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations. Indianapolis, Ind.: Liberty Press.
- SMUL (2013): Einstufung von Gülle zur Verwendung in Biogasanlagen als Abfall oder Nebenprodukt. Online verfügbar unter <http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/30562.htm>.
- Social Accountability International (2014): Social Accountability 8000. International Standard. Online verfügbar unter [http://sa-intl.org/\\_data/n\\_0001/resources/live/SA8000%20Standard%202014.pdf](http://sa-intl.org/_data/n_0001/resources/live/SA8000%20Standard%202014.pdf), zuletzt geprüft am 29.01.2015.
- Spangenberg, J. (2003): Soziale Nachhaltigkeit. Eine integrierte Perspektive für Deutschland. In: UTOPIE kreativ (153/154), S. 649-661.
- Specht, E.; Becker, f. H. (2014): Öfen für geformtes Gut. In: K.-H. Grote und J. Feldhusen (Hg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. M 23-M44.
- Speck, H.-J. (1998): Methode zur entwicklungsbegleitenden Ergebnisdokumentation bei der Produktdatenmodellentwicklung. Aachen: Shaker Verlag.
- Spengler, T.; Schröter, M. (2001): Einsatz von Operations Research im produktbezogenen Umweltschutz. Stand und Perspektiven. In: Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis 53 (3), S. 227-244.
- Spur, L. (2000): Produktion. In: H. Czichos (Hg.): Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. L1-L49.
- Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York: Springer-Verlag/Wien.

Stahl, B. (1998): Methodenvergleich und Methodenentwicklung zur Lösung der Bewertungsproblematik in produktbezogenen Oekobilanzen. Dissertation. Universität Bremen, Bremen. Produktionstechnik.

Stahlwerk Annahütte (2015): Schrottpreisentwicklung. Online verfügbar unter <http://www.annahuette.com/Schrottpreisentwicklung.html>, zuletzt geprüft am 14.04.2015.

Stark, R.; Lindow, K.; Woll, R.; Kind, C. (2008): Beitrag der Produktentstehung zur Nachhaltigkeit. In: Klaus Brökel, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Frank Rieg und Ralph Stelzer (Hg.): 6. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2008. Nachhaltige und effiziente Produktentwicklung. Aachen: Shaker Verlag, S. 191–200.

Statistisches Bundesamt (2008): Klassifikation der Wirtschaftszweige. Mit Erläuterungen. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/GueterWirtschaftsklassifikationen/klassifikationwz2008\\_erl.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/GueterWirtschaftsklassifikationen/klassifikationwz2008_erl.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 05.03.2015.

Statistisches Bundesamt (2014): Produzierendes Gewerbe. Produktion des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Konjunkturdaten/ProduktionVj2040310133244.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Konjunkturdaten/ProduktionVj2040310133244.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 22.07.2015.

Statistisches Bundesamt (2015a): Abschnitt des VW Golf im Zeitraum der Jahre 1974 bis 2012 nach Modell (in Millionen). Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/240184/umfrage/Abschnitt-des-vw-golf-nach-modell/>, zuletzt geprüft am 26.10.2015.

Statistisches Bundesamt (2015b): Ermittlung der Bruttowertschöpfung. Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Wiesbaden. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Strukturdaten/Kostenstruktur2040430137004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Strukturdaten/Kostenstruktur2040430137004.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 23.06.2015.

Statistisches Bundesamt (2015c): Erzeugung. Bruttostromerzeugung in Deutschland für 2012 bis 2014. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung/Tabellen/Bruttostromerzeugung.html>, zuletzt geprüft am 27.07.2015.

Statistisches Bundesamt (2015d): Private Konsumausgaben. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/164774/umfrage/konsumausgaben-private-haushalte>, zuletzt geprüft am 02.11.2015.

Statistisches Bundesamt (2015e): Produzierendes Gewerbe. Beschäftigung, Umsatz, Investitionen und Kostenstruktur der Unternehmen in der Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Energie/Struktur/BeschaeftigungUmsatzKostenstruktur2040610137004.pdf;jsessionid=AD284349758BDDCA179275AD7FAF5D6F.cae2?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Energie/Struktur/BeschaeftigungUmsatzKostenstruktur2040610137004.pdf;jsessionid=AD284349758BDDCA179275AD7FAF5D6F.cae2?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 31.07.2015.

Statistisches Bundesamt (2015f): Produzierendes Gewerbe. Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/>

Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Strukturdaten/Kostenstruktur2040430137004.pdf?\_\_blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 07.07.2015.

Statistisches Bundesamt (2015g): Verdienste und Arbeitskosten. Arbeitnehmerverdienste. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VerdiensteArbeitskosten/Arbeitnehmerverdienste/Arbeitnehmerverdienst\\_eVj2160210153224.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VerdiensteArbeitskosten/Arbeitnehmerverdienste/Arbeitnehmerverdienst_eVj2160210153224.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 30.10.2015

Statistisches Bundesamt (2015h): Zahlen & Fakten kurz erläutert. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Wirtschaftsbereiche.html>, zuletzt geprüft am 27.10.2015.

Stechert, C. (2010): Modellierung komplexer Anforderungen. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig. Institut für Konstruktionstechnik.

Steinhilper, R. (2009): Remanufacturing und Recycling. In: H.-J. Bullinger, D. Spath, H.-J. Warnecke und E. Westkämper (Hg.): Handbuch Unternehmensorganisation: Strategien, Planung, Umsetzung. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 273-293.

Steinhilper, R. (2012): Service Engineering. In: F. Rieg und R. Steinhilper (Hg.): Handbuch Konstruktion. München Wien: Carl Hanser Verlag, S. 751-784.

Sterr, T. (2003): Industrielle Stoffkreislaufwirtschaft im regionalen Kontext. Betriebswirtschaftlich-ökologische und geographische Betrachtungen in Theorie und Praxis. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Stoffel, T. (2014): Konzepte von Green Economy und Green Society – Soziale Aspekte Grünen Wirtschaftens im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. In: K. Dobersalske, N. Seeger und H. Willing (Hg.): Verantwortliches Wirtschaften. Nachhaltigkeit in der Betriebswirtschaftslehre. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft, S. 49-69.

Sutcliffe, L. F. R.; Maier, A.; Moultrie, J.; Clarkson, P. J. (2009): Development of a framework for assessing sustainability in new product development. In: Proceedings of 17th International Conference on Engineering Design 7, S. 289-300.

The International Federation of Robotics (2014): World Robotics Industrial Robots and Service Robots. Online verfügbar unter [www.worldrobotics.org/uploads/media/Executive\\_Summary\\_WR\\_2014\\_02.pdf](http://www.worldrobotics.org/uploads/media/Executive_Summary_WR_2014_02.pdf), zuletzt geprüft am 13.05.2015.

Thommen, J.-P.; Achleitner, A.-K. (2012): Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden: Springer Gabler.

Thomsen, I. (2010): Buchführung und Bilanz nach HGB. Kompakte Lerneinheiten mit Abschlusstest und Teilnahmebestätigung. München: Rudolf Haufe Verlag GmbH & Co. KG.

ThyssenKrupp (2013): Tiefziehstähle DD, DC und DX. Für Bauteile höchster Umformkomplexität. Online verfügbar unter [http://www.thyssenkrupp.at/files/qs/TechnischeInfo/Feinblech%20und%20oberflaechenveredeltes%20Material/produktinformation\\_tiefziehstaehle\\_dd\\_dx\\_und\\_dc\\_de.pdf](http://www.thyssenkrupp.at/files/qs/TechnischeInfo/Feinblech%20und%20oberflaechenveredeltes%20Material/produktinformation_tiefziehstaehle_dd_dx_und_dc_de.pdf), zuletzt geprüft am 09.03.2015.

ThyssenKrupp Steel Europe AG (2013): Preisliste Bandstahl/Warmbreitband. Online verfügbar unter [https://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/media/content\\_1/publikationen/bandstahl\\_warmbreitband\\_gueltig\\_ab\\_01012013\\_de.pdf](https://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/media/content_1/publikationen/bandstahl_warmbreitband_gueltig_ab_01012013_de.pdf), zuletzt geprüft am 22.07.2015.

- Tischner, U. (2000): Teil 1: Leitfaden. Einleitung: EcoDesign in der Praxis. In: Umweltbundesamt Berlin (Hg.): Was ist EcoDesign? Ein Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung. Frankfurt am Main: Verlag Form, S. 9-14.
- Tischner, U.; Charter, M. (2001): Sustainable product design. In: M. Charter und U. Tischner (Hg.): Sustainable solutions. Developing products and services for the future. Sheffield, U.K.: Greenleaf Publishing Limited, S. 118-138.
- Tischner, U.; Dietz, B. (2000): Der Ecodesign Prozess. In: Umweltbundesamt Berlin (Hg.): Was ist EcoDesign? Ein Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung. Frankfurt am Main: Verlag Form, S. 39-63.
- Töpfer, A. (2007): Betriebswirtschaftslehre. Anwendungs- und prozessorientierte Grundlagen. Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Tower Automotive Presswerk Zwickau GmbH (2009): Tower Automotive Presswerk Zwickau GmbH. Online verfügbar unter [http://www.amz-sachsen.de/de/lieferantenportal\\_carnet/detail/?tx\\_amzdb\\_pi2\[tx\\_amzdb\\_company\]=14370](http://www.amz-sachsen.de/de/lieferantenportal_carnet/detail/?tx_amzdb_pi2[tx_amzdb_company]=14370), zuletzt geprüft am 03.03.2015.
- Trares, Thomas (2008): Automobilzulieferer: Die Finanzkrise ist übergeschwappt. München: GBI-Genios Verlag.
- Triebskorn, E. (2012): Der deutsche Außenhandel im Jahr 2011. In: Statistisches Bundesamt (Hg.): Wirtschaft und Statistik. Wiesbaden: destatis, S. 332-342.
- Ulich, E.; Groskurth, P.; Bruggemann, A. (1973): Neue Formen der Arbeitsgestaltung. Möglichkeiten und Probleme einer Verbesserung der Qualität des Arbeitslebens. Frankfurt am Main: Europäische Verlagsanstalt.
- Umweltbundesamt (2015): Willkommen bei ProBas! Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/>, zuletzt geprüft am 27.10.2015.
- Umweltbundesamt (2008): Bericht zu den Auswirkungen von REACH auf Recycling/Verwertung. Online verfügbar unter [http://www.reach-info.de/dokumente/Bericht\\_REACH\\_und\\_Recycling.pdf](http://www.reach-info.de/dokumente/Bericht_REACH_und_Recycling.pdf), zuletzt geprüft am 03.11.2014.
- United Nations (2014): Report of the Open Working Group of the General Assembly on Sustainable Development Goals. Online verfügbar unter [http://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/68/970](http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/68/970), zuletzt geprüft am 21.09.2015.
- VDI 2210 (1975): Datenverarbeitung in der Konstruktion; Analyse des Konstruktionsprozesses im Hinblick auf den EDV-Einsatz.
- VDI 2235 (1987): Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren; Methoden und Hilfen, zuletzt geprüft am 07.10.2014.
- VDI 2234 (1990): Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur.
- VDI 2243 Blatt 1 (1993): Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte - Grundlagen und Gestaltungsregeln.
- VDI 2221 (1993): Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.
- VDI 2803 Blatt 1 (1996): Funktionenanalyse – Grundlagen und Methode.
- VDI 2222 Blatt 1 (1997): Konstruktionsmethodik – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien.

- VDI 2225 Blatt 1 (1997): Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Vereinfachte Kostenermittlung.
- VDI 2225 Blatt 3 (1998): Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung.
- VDI 2243 (2002): Recyclingorientierte Produktentwicklung.
- VDI 2223 (2004): Methodisches Entwerfen technischer Produkte.
- VDI 2884 (2005): Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC).
- VDI 4070 Blatt 1 (2006): Nachhaltiges Wirtschaften in kleinen und mittelständischen Unternehmen – Anleitung zum Nachhaltigen Wirtschaften.
- VDI 3330 (2007): Kosten des Materialflusses.
- VDI 4600 (2012): Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden.
- VDI 4800 Blatt 1 (2014): Ressourceneffizienz – Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien.
- VDI 4082 (2015): Automobilverwertung – Trockenlegung und Vorbehandlung von Fahrzeugen auf die Demontage.
- VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (2015): VDI-Richtlinien zur Ressourceneffizienz. Online verfügbar unter [http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/bilder/produzieren/Industrie\\_Diagramm\\_T2-RL.jpg](http://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/bilder/produzieren/Industrie_Diagramm_T2-RL.jpg).
- VDMA 34160 (2006): Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen.
- Verband der Automobilindustrie e. V.; Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller e. V. (2012): Leitfaden über den Kraftstoffverbrauch, die CO<sub>2</sub>-Emissionen und den Stromverbrauch. Hg. v. Deutsche Automobil Treuhand GmbH. Ostfildern. Online verfügbar unter <https://www.dat.de/fileadmin/media/LeitfadenCO2/LeitfadenCO2.pdf>, zuletzt geprüft am 19.06.2015.
- Vernon, R. (1966): International Investment and International Trade in the Product Cycle. In: The Quarterly Journal of Economics 80 (2), S. 190-207.
- Verordnung (EU) Nr. 333/2011: Verordnung mit Kriterien zur Festlegung, wann bestimmte Arten von Schrott gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates nicht mehr als Abfall anzusehen sind vom 31.03.2011.
- VerpackV: Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen vom 17.07.2014.
- Vertrag von Amsterdam: Vertrag von Amsterdam zur Änderung des Vertrags über die Europäische Union, der Verträge zur Gründung der Europäischen Gemeinschaften sowie einiger damit zusammenhängender Rechtsakte vom 02.10.1997.
- Vezzoli, C.; Manzini, E. (2008): Design for environmental sustainability. London: Springer-Verlag.
- Volkswagen Sachsen GmbH (2015): Das Presswerk. Online verfügbar unter [http://www.volkswagen-sachsen.de/besucherservice/rundgang/rundgang\\_zwickau/index.php](http://www.volkswagen-sachsen.de/besucherservice/rundgang/rundgang_zwickau/index.php), zuletzt geprüft am 30.03.2015.

- Völz, Horst (1999): Das Mensch-Technik-System. Physiologische, physikalische und technische Grundlagen – Software und Hardware. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag.
- von Hauff, M. (2011): Nachhaltigkeit – ein Erfolgsfaktor für mittelständische Unternehmen. Anforderungen an Politik, Gewerkschaften und Unternehmen. Online verfügbar unter <http://library.fes.de/pdf-files/wiso/08225.pdf>, zuletzt geprüft am 03.02.2015.
- von Hauff, M.; Kleine, A. (2005): Methodischer Ansatz zur Systematisierung von Handlungsfeldern und Indikatoren einer Nachhaltigkeitsstrategie. Das Integrierende Nachhaltigkeits-Dreieck. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern.
- von Hauff, Michael; Kleine, Alexandro (2009): Nachhaltige Entwicklung. Grundlagen und Umsetzung. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- von Thenen, S.; Österle, U.; Hoffmann, M. (2006): Sozialkapital und Arbeitslosigkeit. In: Geographica Timisiensis 15 (1-2), S. 43-54.
- VTT Technical Research Centre of Finland (2011): Sustainability gaps and stakeholder requirements. Online verfügbar unter [http://www.sustainvalue.eu/publications/D1\\_1\\_final\\_Rev1\\_0\\_web.pdf](http://www.sustainvalue.eu/publications/D1_1_final_Rev1_0_web.pdf), zuletzt geprüft am 05.02.2015.
- VW Parts America (2015): Genuine Original Equipment Replacement Parts. Online verfügbar unter <http://www.volkswagenpartsamerica.com/media/images/oe/collision/9/9276572.gif>, zuletzt geprüft am 17.07.2015.
- Wäldele, . (2012): Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.
- Walter, I.; Pearce, D. W. (1978): Resource conservation. Social and economic dimensions of recycling: international symposium; Bellagio, November 1976. London: Addison-Wesley Educational Publishers Inc.
- Walther, G. (2010): Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke. Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus. Wiesbaden: Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- WasEG: Gesetz über die Erhebung eines Entgelts für die Entnahme von Wasser aus Gewässern vom 27.01.2004.
- WDR / SWR / ARD-alpha 2015 (2008): Kinderarbeit in Indien. Online verfügbar unter [http://www.planet-wissen.de/politik\\_geschichte/menschenrechte/kinderarbeit/video\\_fairtrade\\_kinderarbeit.jsp](http://www.planet-wissen.de/politik_geschichte/menschenrechte/kinderarbeit/video_fairtrade_kinderarbeit.jsp), zuletzt geprüft am 02.06.2015.
- Weissbuch, F. (2006): Entwicklung eines Überwachungssystems für Strangguss-Kokillen. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Essen. Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau.
- Wellmer, F.-W. (2005): Neue Basisstoffe. Perspektiven. In: P. Kausch und J. Matschulat (Hg.): Rohstoffe der Zukunft – Neue Basisstoffe und neue Energien. Berlin: Frank & Timme GmbH, S. 175-218.
- Wens, B.; Julius, J.; Pretz, T. (2011): Recycling von Nichteisenmetallen aus Siedlungsabfällen: Anforderungen an moderne Aufbereitungstechniken. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 63 (3-4), S. 53-60.
- Westkämper, E. (2013): Das Modell der digitalen Produktion. In: E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu und J. Lentjes (Hg.): Digitale Produktion. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, S. 11-13.

- Westkämper, E.; Warnecke, H.-J. (2010): Recycling. In: E. Westkämper und H.-J. Warnecke (Hg.): Einführung in die Fertigungstechnik. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, S. 267-283.
- Westkämper, E. (2006): Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wiener, N. (1975): Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. Cambridge - Massachusetts - USA: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Wimmer, W.; Züst, R. (2001): ECODesign-Pilot. Produkt-Innovations-, Lern- und Optimierungstool für umweltgerechte Produktgestaltung. Zürich: Orell Füssli Verlag AG.
- Winkler, R.; Winzer, P.; Frei, M. (2000): Umweltgerechte Produktentwicklung – ein Erfordernis der Zeit. In: H. Birkhofer (Hg.): Umweltgerechte Produktentwicklung. Ein Leitfaden für Entwicklung und Konstruktion. Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag GmbH, S. Kapitel 2.1/S. 1-Kapitel 2.1/S. 4.
- Winner, R. I.; Pennell, J. P.; Bertrand, H. E.; Slusarczyk M. M. G. (1988): The Role of Concurrent Engineering in Weapons System Acquisition. Alexandria, Virginia – USA: Institute for Defense Analyses Report R-338.
- Wirtschaftsvereinigung Stahl Stahlinstitut VDEh (Hg.) (2013): Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2013/2014. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH.
- Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2004): Der Aktuelle Begriff – Nachhaltigkeit. Nr. 06/2004. Online verfügbar unter [http://webarchiv.bundestag.de/archive/2008/0506/wissen/analysen/2004/2004\\_04\\_06.pdf](http://webarchiv.bundestag.de/archive/2008/0506/wissen/analysen/2004/2004_04_06.pdf), zuletzt geprüft am 24.04.2014.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (1996): Welt im Wandel. Herausforderung für die deutsche Wissenschaft. Online verfügbar unter [www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg1996/wbgu\\_jg1996.pdf](http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg1996/wbgu_jg1996.pdf), zuletzt geprüft am 25.04.2015.
- Witt, G. (2013): Presse-Information. Deutsche wollen Nachhaltigkeit, aber nicht mehr dafür zahlen. Online verfügbar unter [http://www.ipsos.de/assets/files/presse/2013/pressemitteilungen/Ipsos-PI\\_NachhaltigeProdukte\\_Dezember2013.pdf](http://www.ipsos.de/assets/files/presse/2013/pressemitteilungen/Ipsos-PI_NachhaltigeProdukte_Dezember2013.pdf), zuletzt geprüft am 24.03.2015.
- Wöhe, G.; Döring, U. (2013): Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 25., überarb. und aktualisierte Aufl. München: Vahlen.
- Wollmann, H. (1998): Ausgleichsanspruch und Mindestkündigungsfrist des KFZ-Eigenhändlers. In: *ecolex*.
- Woodward, D. G. (1997): Life cycle costing – Theory, information acquisition and application. In: *International Journal of Project Management* 15 (6), S. 335-344.
- Woolcock, M. (1998): Social capital and economic development: Toward a theoretical synthesis and policy framework. In: *Theory and Society* 27 (2), S. 151-208.
- World Commission on Environment and Development (1987): Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development. Commissione mondiale per l'ambiente e lo sviluppo.
- Wübbenhorst, K. L. (1986): Life Cycle Costing for Construction Projects. In: *Long Range Planning* 19 (4), S. 87-97.

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (2014): Materialintensität von Materialien, Energieträgern, Transportleistungen, Lebensmitteln. Online verfügbar unter [http://wupperinst.org/uploads/tx\\_wupperinst/MIT\\_2014.pdf](http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/MIT_2014.pdf), zuletzt geprüft am 03.08.2015.

Yun-hee, L.; Kyeong-hee, L.; Sun-young, K.; Ji-yeon, S.; Jae-su, J. (2009): Sustainable Product Development for the Air Cleaner and Student Desk-set based on the consumer research. In: Proceedings of EcoDesign 2009: 6th International Symposium on Environmentally Conscious Design, 1-6.

Zantow, R.; Dinauer, J. (2011): Finanzwirtschaft des Unternehmens. Die Grundlagen des modernen Finanzmanagements. München: Pearson Studium.

Zhao, S. (2013): Integriertes Management von ökonomischen und ökologischen Produkteigenschaften. Eine EcoDesign-Methodik für kleine und mittlere Unternehmen. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.

Zier, S. (2014): Elementarmethoden in der Produktentwicklung. Identifikation methodischer Prinzipien und ihre Potenziale für Lehre, Praxis und Forschung. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.

Zukunftskommission der Friedrich-Ebert-Stiftung (1998): Economic performance, social cohesion, environmental sustainability. Three goals, one path. Bonn: Verlag JRW, Dietz Nachf. GmbH.

Zupan, M.; Ashby, M.f.; Fleck, N. A. (2002): Actuator Classification and Selection – The Development of a Database. Advanced Engineering Materials. In: Advanced Engineering Materials 4 (12), S. 933-939.

Züst, R. (1998): Produkte im Fokus des Umweltmanagements. In: Georg Winter (Hg.): Das umweltbewusste Unternehmen. Die Zukunft beginnt heute. 6., völlig überarb. und erw. Aufl. München: Vahlen, S. 161-178.

## Lebenslauf

### Persönliche Daten:

Name: Marko Ćorić  
Geburtsdatum: 4. Februar 1985  
Geburtsort: Mostar / Bosnien und Herzegowina

### Promotion:

09/2011 - 05/2013      Wissenschaftlicher Mitarbeiter am pmd auf dem Themen-  
gebiet „Mikro-Maschinenelemente“  
06/2013 - 08/2015      Wissenschaftlicher Mitarbeiter am pmd auf dem Themen-  
bereich „Nachhaltige Produktentwicklung“  
06/2016                  Promotionsprüfung zum Doktor-Ingenieur an der Techni-  
schen Universität Darmstadt im Fachbereich Maschinen-  
bau

### Studium:

10/2005 - 03/2009      Bachelor of Science “Mechanical and Process Engineering”  
an der Technischen Universität Darmstadt  
Abschluss: Bachelor of Science  
04/2009 - 07/2011      Master of Science „Mechanical and Process Engineering“  
an der Technischen Universität Darmstadt  
Abschluss: Master of Science

### Schulische Ausbildung:

09/1995 - 06/2004      Heinrich von Gagern Gymnasium, Frankfurt am Main