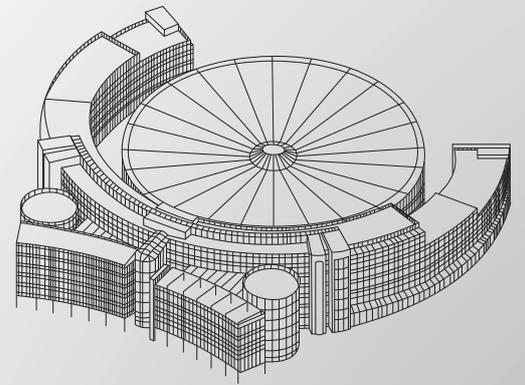


BERICHTE AUS DEM PRODUKTIONSTECHNISCHEN ZENTRUM BERLIN



Kai Lindow
**Wissensbasierte Entwicklung
nachhaltiger Produkte**

 **Fraunhofer**
IPK

INSTITUT
PRODUKTIONSANLAGEN UND
KONSTRUKTIONSTECHNIK

 **iNF**

INSTITUT
WERKZEUGMASCHINEN UND FABRIKBETRIEB
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

BERICHTE AUS DEM PRODUKTIONSTECHNISCHEN ZENTRUM BERLIN

Kai Lindow

Wissensbasierte Entwicklung nachhaltiger Produkte

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. R. Jochem

Prof. Dr.-Ing. H. Kohl

Prof. Dr.-Ing. J. Krüger

Prof. Dr.-Ing. M. Rethmeier

Prof. Dr.-Ing. G. Seliger

Prof. Dr.-Ing. R. Stark

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. E. Uhlmann

 **Fraunhofer**
IPK

INSTITUT
PRODUKTIONSANLAGEN UND
KONSTRUKTIONSTECHNIK

INF

INSTITUT
WERKZEUGMASCHINEN UND FABRIKBETRIEB
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstraße 8-9
10587 Berlin
Telefon 030 39006-0
Fax 030 39110-37
E-Mail info@ipk.fraunhofer.de
URL www.ipk.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über www.dnb.de abrufbar.
ISBN (Print): 978-3-8396-1271-2

D 83

Zugl.: Berlin, TU, Diss., 2016

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2017

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Fax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Wissensbasierte Entwicklung nachhaltiger Produkte

Vorgelegt von

Dipl.-Ing.

Kai Lindow

geb. in Berlin

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Henning J. Meyer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rainer G. Stark

Gutachter: Prof. Dr. Erik G. Hansen

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 5. Dezember 2016

Berlin 2017

Geleitwort des Herausgebers

Die Schriftenreihe „Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin“ wird von den Professoren der im Produktionstechnischen Zentrum Berlin dauerhaft angelegten Fach- und Forschungsgebiete der Technischen Universität Berlin (TU Berlin) gemeinsam herausgegeben. Zweck der Schriftenreihe ist es, die auf den Gebieten der Produktentstehung, Produktionstechnik und Informationstechnik erarbeiteten Forschungsergebnisse einer breiten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. In der Schriftenreihe erscheinen in erster Linie die an den Fachgebieten des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der TU Berlin und am Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik entstandenen Dissertationen. Daneben werden aber auch andere Forschungsberichte, die in den thematischen Rahmen passen und von allgemeinem Interesse sind, in die Schriftenreihe aufgenommen. Die Herausgeber wünschen sich ein reges Interesse an der Schriftenreihe und würden sich freuen, wenn hieraus fruchtbare Dialoge mit Praktikern und Forschern entstünden.

Die vorliegende Dissertationsarbeit von Herrn Dr.-Ing. Kai Lindow stellt eine wegweisende Grundlagenarbeit auf dem Forschungsgebiet der Nachhaltigkeit dar: Sie leitet ein neues wissenschaftliches Fundament ab, insbesondere für die Ausrichtung und Gestaltung der Nachhaltigkeitsdimensionen sowie deren informationstechnische Umsetzung in die Entwicklungswelt des Ingenieurs und schließt somit die wissenschaftliche Lücke zwischen der Nachhaltigkeitsforderung an Produkte und deren Nachhaltigkeitserfüllung über deren Lebensweg. Durch die synergetische Betrachtung der verschiedenen Ebenen der Produktentwicklung (Prozess und Organisation, Entwicklungsaktivitäten und -methoden, Informationstechnologien und -werkzeuge sowie Informationsartefakte und -standards) mit den Kriterien und Modellen der Nachhaltigkeitsdimensionen (Umwelt/Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft/Soziales) entstehen in dieser Arbeit eine neue Vorgehensweise und Lösungen für die verschiedenen Ebenen in den Unternehmen (normative, strategische und operative Ebene).

Dem Autor der vorliegenden Arbeit ist es im besonderen Maße gelungen, eine durchgängige wissenschaftliche Vorgehensweise zu etablieren: Ausgehend von dem entwickelten Rahmen-

konzept sowie dem Erkennen der Probleme in der Praxis und den Defiziten des Standes der Wissenschaft entwickelt der Autor zunächst mit Hilfe von Studien den konkreten wissenschaftlichen Forschungs- und industriellen Handlungsbedarf. Nachfolgend wird ein neues Gesamtkonzept für die wissensbasierte Entwicklung nachhaltiger Produkte abgeleitet und durch eine Machbarkeitsstudie abgesichert. Abschließend entwirft und erprobt der Autor daraus eine anwendungsfähige Vorgehensweise für den Entwicklungsalltag mit konkreten informationstechnischen Lösungen.

Berlin, Juli 2017

Rainer Stark

Vorwort des Autors

Im Jahr 2009 habe ich an meiner ersten internationalen Konferenz zum Thema „Sustainable Manufacturing“ teilgenommen. Die Konferenz fand in Indien statt, und am Ende seines Willkommensvortrags stellte der Schirmherr allen Anwesenden die Frage: „Can we be greedy and sustainable?“ – Können wir als Gesellschaft gierig nach neuen Produkten und Konsum sein und gleichzeitig nachhaltig leben? Eine Antwort auf die Frage konnte auf der Konferenz nicht gefunden werden. Mich sollte die Frage in meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Produktionstechnischen Zentrum Berlin fortan begleiten.

Nahezu zeitgleich zu der besagten Konferenz in Indien veröffentlichten die Vereinten Nationen die Millennium Development Goals – abstrakte Ziele in Bezug auf globale nachhaltige Entwicklung, die von über 180 Ländern auf nationaler Ebene verankert werden sollten. Mit der nationalstaatlichen Ratifizierung der Millennium Development Goals waren erstmals auch explizit Unternehmen aufgefordert, sich mit ihrer Rolle und Verantwortung bei der Entwicklung nachhaltiger Produkte auseinanderzusetzen. Den Ingenieuren kam und kommt hierbei eine maßgebliche Bedeutung zu, denn ihnen obliegt es letztlich, nachhaltige Lösungen für Produkte zu entwickeln. Meine Dissertation setzt an dieser Stelle an. Sie zeigt auf, wie Ingenieure einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung liefern können. Es werden Lösungen vorgestellt, die aufzeigen, wie Organisation, Prozesse, Methoden und Informationstechnik bei der Entscheidungsfindung zusammenwirken und wie diese Ingenieure bei der Entwicklung nachhaltiger Produkte unterstützen.

Viele Gespräche und Diskussionen haben die Arbeit begleitet und zu ihrem Entstehen beigetragen. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark. Er unterstützte mich dabei, die Ausrichtung der Arbeit immer wieder zu schärfen. Zugleich gab er mir stets die Freiheiten, die für die breit angelegte Erschließung meiner Fragestellung notwendig waren. Bei Prof. Dr. Erik Hansen möchte ich mich herzlich für die Zweitbegutachtung der Arbeit bedanken, bei Prof. Dr.-Ing. Henning Meyer für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Großen Dank möchte ich auch meinen Kolleginnen und Kollegen ausspre-

chen, insbesondere Grischa Beier, Marcus Kim, Patrick Müller und Robert Woll. Sie haben unermüdlich zugehört, Fragen gestellt und mich zur Weiterarbeit motiviert. Schließlich haben die Abschlussarbeiten von Andrea Kaluza, André Bergmann, Tom Buchert, Tim Geppert, Friedrich Halstenberg, Oliver Heimann und Alexander Kaluza wichtige Impulse gesetzt und damit zum Gelingen meiner Forschungsarbeit beigetragen. Auch ihnen danke ich.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken – für ihren Beistand und ihre Geduld und dafür, fortwährend an mich und mein Vorhaben geglaubt zu haben.

Berlin, Juli 2017

Kai Lindow

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zielt auf die Integration des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung in produzierende Unternehmen. Sie greift die Frage auf, wie produzierende Unternehmen dazu befähigt werden können, nachhaltige Produkte hervorzubringen. Der Verantwortungsbereich der Produktentwicklung wird dabei über den gesamten Lebensweg des Produktes angelegt. Er schließt somit die Erfüllung von Nachhaltigkeitsforderungen aus den einzelnen Lebensphasen ein. Basierend auf umfangreichen Analysen wird in diesem Zusammenhang sowohl der wissenschaftliche Forschungsbedarf als auch der industrielle Handlungsbedarf beschrieben. Es wird deutlich, dass eine neue Vorgehensweise zur Entwicklung nachhaltiger Produkte die Ebenen Prozess und Organisation, Entwicklungsaktivitäten und -methoden, Informationstechnologien und Werkzeuge sowie Informationsartefakte und -standards integrativ betrachten und deren ideales Zusammenspiel beschreiben muss. Vor diesem Hintergrund wird mit dieser Arbeit ein neues Vorgehensmodell vorgeschlagen, das so genannte Regelkreise zur Verbesserung der Konstruktion, zur verbesserten Bewertung des Konstruktionsmodells und letztendlich zur verbesserten Entscheidungsfindung beinhaltet. Das neue Vorgehensmodell wird konzeptionell beschrieben und exemplarisch umgesetzt. Es unterstützt Produktentwicklerinnen und -entwickler gezielt darin, ihrer Verantwortung für eine nachhaltige Entwicklung nachzukommen und Produkte über den gesamten Lebensweg ressourcenschonend, umweltfreundlich und sozialverträglich zu gestalten. Zugleich macht es den Einfluss deutlich, den die Produktentwicklung auf die Nachhaltigkeit eines Produktes hat. In diesem Rahmen zeigt die vorliegende Arbeit auf, welchen Beitrag produktionstechnische Ansätze in der Entwicklung von Produkten zum gesellschaftlich motivierten Thema einer nachhaltigen Entwicklung leisten können.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungen	10
1 Einleitung	12
1.1 Motivation und Problemstellung	12
1.2 Zielsetzung.....	15
1.3 Forschungsansatz und Aufbau der Arbeit.....	16
2 Theoretisches Rahmenkonzept.....	19
2.1 Positionierung der Forschungsarbeit.....	19
2.2 Leitbild der nachhaltigen Entwicklung.....	21
2.3 Modelle und Theorien einer nachhaltigen Entwicklung	26
2.3.1 Drei-Säulen-Modelle	27
2.3.2 Theorie starker Nachhaltigkeit.....	29
2.3.3 Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke	30
2.4 Verbindlichkeit einer nachhaltigen Entwicklung aus Unternehmenssicht	31
2.5 Beitrag der Ingenieurwissenschaften zur nachhaltigen Entwicklung	36
2.5.1 Nachhaltiges Produkt.....	36
2.5.2 Nachhaltigkeitspyramide	39
2.5.3 Status quo	40
2.6 Implikationen für die Erforschung des Themas.....	45
3 Stand der Technik.....	48
3.1 Lebenszyklusdenken und Produktentstehungsprozesse	48

3.1.1	Begriffsbestimmung und Einordnung	48
3.1.2	Relevante Forschungsarbeiten.....	51
3.2	Wissensverarbeitung und Informationstechnologien	73
3.2.1	Begriffsbestimmung und Einordnung	73
3.2.2	Relevante Forschungsarbeiten und existierende Technologien	74
4	Forschungsbedarf	93
4.1	Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik.....	93
4.2	Validierung durch die wissenschaftliche Community	95
5	Studie zum Lebenszyklusdenken und -handeln in der industriellen Praxis	99
5.1	Fragestellung	99
5.2	Stichprobe.....	99
5.2.1	Begründung und Vorstellung der Branche	99
5.2.2	Systematische Auswahl von Unternehmen	102
5.2.3	Auswahl der Expertenrunde	109
5.3	Erhebung	111
5.3.1	Methode.....	111
5.3.2	Durchführung	111
5.4	Ergebnisse	112
5.4.1	Deskriptive Darstellung.....	112
5.4.2	Interpretation der Ergebnisse.....	115
5.4.3	Auswertung der Ergebnisse.....	116
6	Handlungsbedarf	118
6.1	Darstellung des Handlungsbedarfs	118
6.2	Detaillierung der Forschungsfragen	121
7	Konzept für eine neue Entwicklungsvorgehensweise	123
7.1	Betrachtungshorizont	123
7.2	Prozess und Organisation	124
7.3	Entwicklungsaktivitäten und -methoden	125
7.4	Informationstechnologien und Werkzeuge	128

7.5	Informationsartefakte und -standards	131
7.6	Neue Entwicklungsvorgehensweise	136
8	Machbarkeitsstudie	142
8.1	Begründung und Vorgehensweise	142
8.2	Methode des Preference Set-based Design (PSD).....	144
8.2.1	Lösungsräume darstellen	145
8.2.2	Lösungsräume übertragen	146
8.2.3	Lösungsräume einschränken	147
8.3	Exemplarischer Anwendungsfall	148
8.3.1	Nachhaltigkeitsforderungen	148
8.3.2	Fallbeschreibung	149
8.3.3	Anwendung und Ergebnisdarstellung	151
8.4	Auswertung und Fazit	153
9	Entwicklung einer anwendungsfähigen Vorgehensweise.....	155
9.1	Anforderungen	155
9.2	Anwendungsszenario	157
9.3	Prototypische Umsetzung	157
9.3.1	Prozess und Organisation	157
9.3.2	Entwicklungsaktivitäten und -methoden.....	158
9.3.3	Informationstechnologien und Werkzeuge.....	159
9.3.4	Informationsartefakte und -standards.....	161
9.4	Anwendungsbeispiel	164
9.5	Auswertung und Fazit	172
10	Zusammenfassung und Zukunftsperspektiven	174
11	Literatur- und Quellenverzeichnis	178
	Anhang	195

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verteilung der weltweiten CO2-Emissionen nach Sektoren (IEA 2015, S.10)	14
Abbildung 2:	Zusammenhang zwischen Nachhaltigkeitsforderungen und Nachhaltigkeitserfüllung	15
Abbildung 3:	Aufbau der Arbeit mit Darstellung der erzielten Ergebnisse und der jeweiligen Vorgehensweisen.....	17
Abbildung 4:	Produktionssystem (Spur und Krause 1997, S. 37).....	20
Abbildung 5:	Orientierungsrahmen der Arbeit.....	21
Abbildung 6:	Detaillierung des Teilziels „Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen“ (im Original: „Goal 12. Ensure sustainable consumption and production patterns“ (Goal 12)) aus den Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen (UN 2015, S. 26f.)	25
Abbildung 7:	Das magische Dreieck der Nachhaltigkeit (nach Serageldin 1995, S. 17)....	27
Abbildung 8:	Venn-Diagramm zum Drei-Säulen-Konzept der Nachhaltigkeit (in Anlehnung an Rodriguez et al. 2002; Loveridge 2009, S. 219)	29
Abbildung 9:	Wertschöpfungsmodul über der Triple-Bottom-Line (nach Seliger 2012)	31
Abbildung 10:	Verbindlichkeit zwischen Unternehmen und Gesellschaft für eine nachhaltige Entwicklung aus Unternehmenssicht.....	33
Abbildung 11:	Erweiterung des Verantwortungsbereichs und des Geschäftsmodells von produzierenden Unternehmen aus dem Bereich der Mobilität.....	37
Abbildung 12:	Kriterien für erfolgreiche Entwicklungsprozesse.....	38
Abbildung 13:	Möglichkeit der Nachhaltigkeitsbeeinflussung und -beurteilung in Analogie zur Kostenbeeinflussung und -beurteilung in der Produktentwicklung	39
Abbildung 14:	Ebenen der Nachhaltigkeit im Unternehmen	39

Abbildung 15:	Integration auf der strategischen Ebene am Beispiel der Mercedes-Benz Car Group (nach Ruhland et al. 2004)	42
Abbildung 16:	Metriken im Entwicklungsprozess am Beispiel des Ford Product Sustainability Index (Ford 2007, S. 28)	43
Abbildung 17:	Stellgrößen zur CO2-Reduktion in der Fahrzeugentwicklung am Beispiel von (Schwarzer 2014, S. 14)	44
Abbildung 18:	Produktlebenszyklus (in Anlehnung an Jun et al. 2009)	50
Abbildung 19:	Verschiebung des Entwicklungsfokus beim Eco-Design (in Anlehnung an Knight and Jenkins 2009)	55
Abbildung 20:	Zusammenhänge der fünf Eco-Design Prinzipien nach dem EU ECOLIFE Themennetzwerk (nach ECOLIFE 2013)	57
Abbildung 21:	Einordnung von Design for Sustainability und untergeordneter DfX-Konzepte in Relation zum Drei-Säulen Modell der Nachhaltigkeit (nach Ameta 2009)	62
Abbildung 22:	Characteristics and needs auf verschiedenen Ebenen (nach Crul und Diehl 2009, S. 45.)	64
Abbildung 23:	Ablaufplan für die Entwicklung eines nachhaltigen Produktes (nach Crul und Diehl 2009, S. 32.)	65
Abbildung 24:	Benchmarking (nach Crul und Diehl, S. 73.)	65
Abbildung 25:	Modell des Environmental Management Systems (ISO 14001, S. vi)	70
Abbildung 26:	Wissensbereiche von Umweltmanagementsystemen (ISO 14006)	71
Abbildung 27:	Verbindung gültiger Normen zur ISO 14006 (ISO 14006)	71
Abbildung 28:	Struktureller Aufbau des Environmental Design Industrial Template (EDIT) (Pigosso et al. 2010a)	75
Abbildung 29:	Modell des Design-for-Environment Evaluation Tool (D4N) (Pigosso et al. 2010a)	76
Abbildung 30:	Bewertungsvorgehen in ProdTect (Frad und Revnic 2007)	79
Abbildung 31:	Datenimport für ProdTect (Frad und Revnic 2007)	80
Abbildung 32:	Social-Impact Kategorien und Nachhaltigkeitsindikatoren der social hotspots database (SHDB 2016)	82
Abbildung 33:	Integration von PDM/PLM und LCA der Firma greendelta (Ciroth et al. 2013)	87

Abbildung 34:	Zusammenhang zwischen Produkt- und Dokumentenstruktur	88
Abbildung 35:	Die 15 Informationsqualität-Dimensionen (nach Rohweder et al. 2011, S. 29).....	89
Abbildung 36:	Integration von Produktlebenszyklus, Disziplinen und Lieferkette (Supply-Chain) als Ausgangslage für Systems Lifecycle Management (SysLM) (Eigner 2014, S. 281).....	90
Abbildung 37:	Lifecycle Modelling Language (LML) Aufbau im Überblick (LML 2016).....	91
Abbildung 38:	Zusammenhang zwischen Unternehmensebenen und Ebenen der Produktentwicklung (orange Einfärbung).....	94
Abbildung 39:	Kaskade der Auswirkungen von der Produktentwicklung auf die Nachhaltigkeit	97
Abbildung 40:	Darstellung ausgewählter Merkmale des Hybridfahrzeugs Chevrolet Volt (Bildquelle: GM Media Online) gegenüber Faktoren für die Akzeptanz der Kunden (nach Teichmann et al. 2012, S. 143).....	101
Abbildung 41:	Systematischer Auswahlprozess nachhaltig agierender Unternehmen	103
Abbildung 42:	Ergebnisdarstellung einer Datenbankabfrage der GRI Sustainability Disclosure Database, beispielhaft für das Unternehmen MAN Group (GRI 2014).....	108
Abbildung 43:	Ergebnisdarstellung der Expertenbefragung zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten und Entwicklungszielen im Unternehmen	113
Abbildung 44:	Ergebnis der Roadmap entsprechend der Experteneinschätzung zur Priorisierung von zukünftigen Nachhaltigkeitszielstellungen.....	114
Abbildung 45:	Dringliche Handlungsfelder nach Einschätzung der Experten.....	115
Abbildung 46:	Herausforderungen, Qualifikationen und Innovationspotentiale von Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung (Nidumolu et al. 2009)	119
Abbildung 47:	Betrachtungshorizont des Konzeptes	123
Abbildung 48:	Zusammenwirken von gesteuerten und angeleiteten Vorgehensweisen in Entwicklungsprojekten	125
Abbildung 49:	Datenzentrische Betrachtungsweise eines PLM-Systems (Vogel 2006)	129
Abbildung 50:	Zusammenhänge zwischen produktentwicklung, Datenmanagement und Nachhaltigkeitsbewertung auf operativer Ebene	130
Abbildung 51:	Vorgehensweise zur Identifikation der Objektklassen	132

Abbildung 52:	Betrachtungsrahmen zur Analyse von Informationsinputs und -outputs in Entwicklungsaktivitäten (nach Buchert et al. 2014).....	134
Abbildung 53:	Sustainable Information Objects - Objektklassen und beispielhafte Instanziierungen.....	136
Abbildung 54:	Allgemeiner Problemlösungsprozess (nach Haberfaellner und Daenzer 2002, S. 98).....	137
Abbildung 55:	Regelungsmodell der Virtuellen Produktentstehung (nach Stark et al. 2002)	139
Abbildung 56:	Veränderte Vorgehensweise mit Entscheidungs-, Bewertungs- und Konstruktionsregelkreis zum Entwickeln nachhaltiger Produkte	140
Abbildung 57:	Vorgehensweise der Preference Set-based Design (PSD) Methode (Inoue et al. 2010a)	145
Abbildung 58:	Set representation (Zusammenhang zwischen Präferenznummer, Konstruktionsvariablen und Leistungsanforderungen) (Inoue et al. 2012)	146
Abbildung 59:	Übertragung von Lösungsräumen zu einem kontinuierlichen Lösungsraum (Inoue et al. 2012).....	146
Abbildung 60:	Identifizieren von umsetzbaren Lösungen im Schritt des set narrowings der PSD Methode (Inoue et al. 2012).....	147
Abbildung 61:	Identifizieren von umsetzbaren Lösungen durch Kombination von Teilräumen im Schritt des Set Narrowings der PSD Methode (Inoue et al. 2012)	148
Abbildung 62:	Parametrisches CAD-Modell mit Konstruktionsvariablen (Inoue et al. 2010b)	149
Abbildung 63:	Vergleich der beiden Szenarien für die Lichtmaschine als Ergebnis des Schrittes der set representation (Inoue et al. 2010b).....	151
Abbildung 64:	Kontinuierliche Lösungsräume für die Konstruktionsvariablen als Ergebnis des Schrittes der Set Propagation (Inoue et al. 2010b)	152
Abbildung 65:	Lösungsräume für Nachhaltigkeits- und Leistungsorientierung als Ergebnis des Schrittes des set narrowings (Inoue et al. 2012)	153
Abbildung 66:	Lösungsräume für die Konstruktionsvariablen als Ergebnis des Schrittes des set narrowings (Inoue et al. 2012)	153
Abbildung 67:	Nachhaltige Meilensteinziele im Entwicklungsprozess.....	158
Abbildung 68:	Nachhaltige Meilensteinziele und Entwicklungsmethoden im Entwicklungsprozess	159

Abbildung 69:	Nachhaltige Meilensteinziele, Entwicklungsmethoden und IT-Systeme im Entwicklungsprozess	160
Abbildung 70:	Nachhaltige Meilensteinziele, Entwicklungsmethoden und IT-Systeme und Sustainability Information Objects im Entwicklungsprozess	161
Abbildung 71:	Integration von SIO in die Produktstruktur von Siemens PLM Teamcenter 8.3.....	162
Abbildung 72:	Einbettung der Sustainability Information Objects in Siemens PLM Teamcenter am Beispiel eines Items	163
Abbildung 73:	Auszug der neuen Vorgehensweise zum Entwickeln nachhaltiger Produkte (vgl. Kapitel 7.6).....	165
Abbildung 74:	In Teamcenter 8.3 angelegte Produktstruktur eines Abgasturboladers	165
Abbildung 75:	Modell über alle Lebensphasen des Beispielproduktes in GaBi 6.0.....	166
Abbildung 76:	Modell für die Phase der Produktion in GaBi.....	167
Abbildung 77:	Modell für die Phase der Nutzung in GaBi	168
Abbildung 78:	Ansicht des Parameterimportfensters in GaBi 6.0 für Variante 1	169
Abbildung 79:	Ansicht des Parameterimportfensters in GaBi 6.0 für Variante 2	169
Abbildung 80:	Vergleich des Ergebnisses der Lebenszyklusanalysen für Varianten 1 (a) und 2 (b)	170
Abbildung 81:	Vergleich der Attributlisten der Bauteilvarianten des Turbinenrades in NX 7.5 für Variante 1 und 3	171
Abbildung 82:	Ansicht des Parameterimportfensters in GaBi 6.0 für Variante 3	171
Abbildung 83:	Vergleich des Ergebnisses der Lebenszyklusanalysen für Varianten 1 (a) und 3 (b)	172

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Integration des Leitbildes der nachhaltigen Entwicklung in die normative Unternehmensebene	41
Tabelle 2:	Ausprägungsgrad der Themenfelder in den verschiedenen Unternehmensebenen	52
Tabelle 3:	Übersicht für ausgewählte Definitionen der Begriffe Eco-Design und Eco-Innovation	56
Tabelle 4:	Die zehn Prinzipien des UN Global Compact (UN 2013).....	104
Tabelle 5:	Bewertungskategorien und Aspekte (Indikatoren) der Nachhaltigkeitsberichterstattung nach den G4-Richtlinien der Global Reporting Initiative (GRI 2013a, S. 9)	107
Tabelle 6:	Übersicht der Ergebnisse der Pre-Selection und des Screenings.....	109
Tabelle 7:	Taxonomie für Entwicklungsmethoden mit Bezug zur Nachhaltigkeit.....	127
Tabelle 8:	Exemplarische Kategorisierung von Entwicklungsmethoden in einer Taxonomie	128
Tabelle 9:	Auswahl von Nachhaltigkeitsindikatoren mit Bezug zur Produktentwicklung (vollständige Liste siehe Anhang V).....	132
Tabelle 10:	Methoden zur Identifikation von maßgeblichen Nachhaltigkeitsinformationen (Buchert et al. 2014)	133
Tabelle 11:	Beispielhafte Auswahl von Informationsobjekten (nach Buchert et al. 2013).....	135
Tabelle 12:	End-of-Life Szenarien für Bauteile des Fallbeispiels Lichtmaschine (Inoue et al. 2010b).....	150
Tabelle 13:	SIO Klassen mit exemplarischen Instanzierungen	164

Abkürzungen

B2B	Business-to-business
B2C	Business-to-customer
BMBF	Bundesministerium für Wirtschaft und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BOL	Begin-of-Life
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAID	Computer Aided Industrial Design
CAS	Computer Aided Styling
CO2	Kohlenstoffdioxid
D4S	Design for Sustainability
DfE	Design for Environment
DfX	Design for X
DMU	Digital Mock-up
EOL	End-of-Life
FEM	Finite-Elemente-Methode
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung
GRI	Global Reporting Initiative
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanzierung)

LML	Lifecycle Modelling Language
MOL	Mid-of-Life
NGO	Non-governmental organization (Nichtregierungsorganisation)
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
PSD	Preference Set-based Design
QFD	Quality Function Deployment
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
RoHS	Restriction of Hazardous Substances (EU Richtlinie)
SIO	Sustainability Information Object
SPD	Sustainable Product Development
SysLM	Systems Lifecycle Management
UML	Unified Modelling Language
UN	United Nations
WCED	World Commission on Environment and Development

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

„We are announcing today 17 Sustainable Development Goals with 169 associated targets which are integrated and indivisible. Never before have world leaders pledged common action and endeavour across such a broad and universal policy agenda. We are setting out together on the path towards sustainable development [...]. The new Goals and targets will come into effect on 1 January 2016 and will guide the decisions we take over the next 15 years. All of us will work to implement the Agenda within our own countries and at the regional and global levels, taking into account different national realities, capacities and levels of development and respecting national policies and priorities.“ (UN 2015, S. 9ff.)

Nachhaltige Entwicklung ist eine globale Aufgabe. So verabschiedete die Vollversammlung der Vereinten Nationen (United Nations, UN) im September 2015 die Agenda zu einer nachhaltigen Entwicklung für die kommenden 15 Jahre. Darin wurden 17 wesentliche nachhaltige Entwicklungsziele festgehalten. Die Ziele sind eine Weiterentwicklung der Millennium Development Goals aus dem Jahr 2000. Während zum damaligen Zeitpunkt noch das übergeordnete Ziel der Halbierung der Armut in der Welt bis zum Jahr 2015 verfolgt wurde, nehmen die Sustainable Development Goals erstmalig auf Ebene der Vereinten Nationen nun auch das Thema Produktion als ein Handlungsziel auf: „Ensure sustainable consumption and production patterns“ (Goal 12). (UN 2015)

Auch in nationalen Programmen wird eine nachhaltige Entwicklung verankert und umgesetzt. Die Bundesregierung erklärt nachhaltige Entwicklung zu einer gesellschaftlichen Aufgabe und legt sie entsprechend der neuen Hightech-Strategie – Innovationen für Deutschland – zugrunde. Mit der Hightech-Strategie verfolgt die Bundesregierung das Ziel, zukunftsfähige Lösungen und deren Realisierung im Rahmen ihrer Forschungs- und Innovationspolitik zu fördern. Es soll ein Umfeld geschaffen werden, in dem Ideen und Innovationen in marktfähige Produkte und Dienstleistungen münden. Dabei steht die Art und Weise, wie produziert und konsumiert wird, im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung. So sollen alle wertschöp-

fenden Prozesse zukünftig ressourcenschonender, umweltfreundlicher, sozialverträglicher und damit nachhaltiger werden. (BMBF 2014, S. 18ff.)

Sowohl die Vereinten Nationen als auch die Bundesregierung sehen ein Vorankommen nur dann als möglich an, wenn Konsumenten und produzierende Unternehmen gleichermaßen die Verantwortung für eine nachhaltige Entwicklung übernehmen. Auf Seiten der Konsumenten lässt sich derzeit eine Diskrepanz zwischen der Absicht, nachhaltig zu handeln, und dem Unvermögen, dies zum Verkaufspunkt umzusetzen (u.a. Lin und Huang 2011), beobachten. Diese Diskrepanz wird auch als halo effect (Auger und Devinney 2007), attitude-intention gap (Vermeir und Verbeke 2006) oder value-action gap (Blake 1999) bezeichnet und in wissenschaftlichen Studien untersucht (u.a. Ferguson 2014). Bisherige Lösungen wie beispielsweise Eco-labels erhöhen zwar die Zahlungsbereitschaft der Konsumenten, haben sich aber noch nicht in großem Maßstab durchsetzen können (Horne 2009). Andere Lösungen zielen auf die psychologische und moralische Ebene der Konsumenten ab, z.B. Sozialkognitive Lerntheorie nach Henry (Henry 2009), sind aber noch Gegenstand der Grundlagenforschung und werden sich wahrscheinlich erst langfristig durchsetzen können.

Sich allein auf die Konsumenten zu verlassen und auf einen gesellschaftspolitischen Bewusstseinswandel zu hoffen, wird dem Leitbild einer Nachhaltigen Entwicklung jedoch auch nicht gerecht. Die vorliegende Arbeit zielt deshalb auf die Verantwortung der Unternehmen, insbesondere bei der Entwicklung von Produkten, ab. Sie greift die Frage auf, wie das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung in Produktentwicklungsprojekte von Unternehmen verankert werden kann. Dabei wird immer wieder deutlich: Das klassische Entwicklungsprinzip des magischen Dreiecks – bestehend aus Zeit, Kosten und Qualität – mit dem Prinzip einer nachhaltigen Entwicklung in Einklang zu bringen, ist eine, wenn nicht gar die zentrale Herausforderung nachhaltiger Produktentwicklung.

Diese Erkenntnis wird auch von Endris et al. (Endris et al. 2011) gestützt. Die Autoren zeigen in ihrer Studie auf, dass Unternehmen zwar grundsätzlich den Aspekten Produktentwicklung und -konstruktion bei der Umsetzung von Nachhaltigkeitszielen die größte Bedeutung beimessen, dass jedoch diejenigen Personen, die direkt an der Entwicklung und Konstruktion beschäftigt sind, ihre Prioritäten anders setzen. Endris et al. haben schließlich auch herausgefunden, dass Nachhaltigkeitsprojekte meistens an zwei Aspekten scheitern: Erstens, weil entscheidungsrelevante Informationen und Wissen über die Auswirkungen von komplexen Produkten auf Umwelt und Gesellschaft über den gesamten Lebensweg nicht in ausreichendem Maße verfügbar sind; zweitens, weil zu große Unsicherheiten bezüglich des Nachziehens

von Zulieferern (Supplier compliance), der Integration von Fertigungsmöglichkeiten und der Marktakzeptanz durch den Käufer bestehen. (Endris et al. 2011)

Dieses Ergebnis lässt sich am Beispiel der Mobilität wie folgt verdeutlichen. Im Sektor Transport werden nach Angaben der International Energy Agency mit 23% Anteil die weltweit zweithöchsten CO₂-Emissionen verursacht (IEA 2015, S.10). Der Wert bezieht sich auf die Nutzungsphase von Mobilitätslösungen. Wird die Herstellung der entsprechenden Lösungen mit einbezogen, dürfte der Anteil noch weiter steigen. Einen Überblick der Sektoren und deren Anteil an den weltweiten CO₂-Emissionen bietet Abbildung 1.

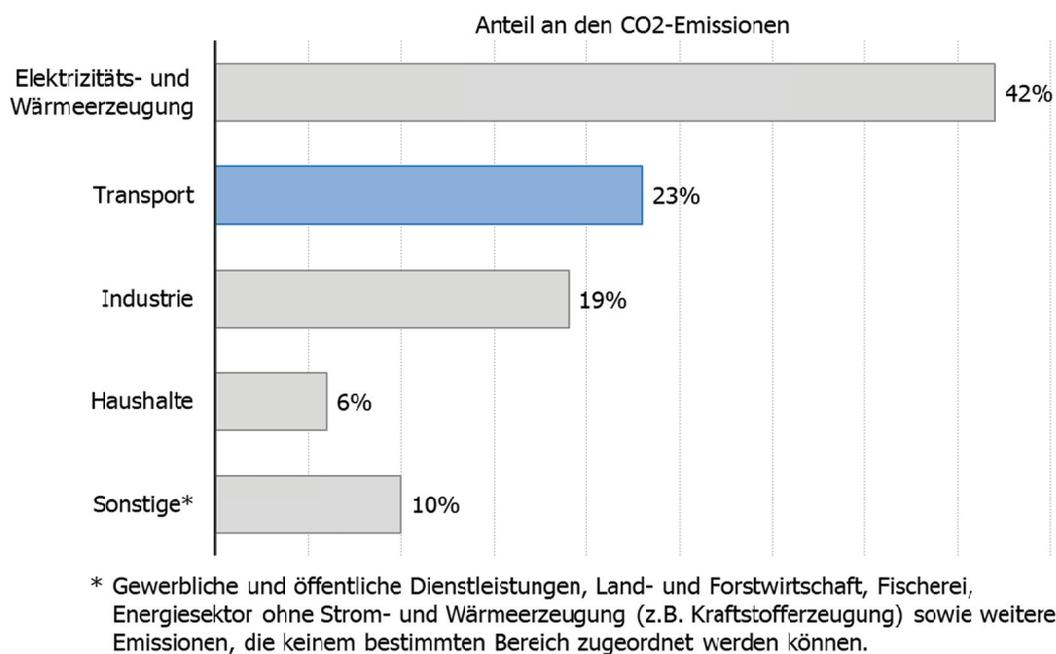


Abbildung 1: Verteilung der weltweiten CO₂-Emissionen nach Sektoren (IEA 2015, S.10)

Es ist festzuhalten, dass Produkte bzw. Produktsysteme, die im Bereich der Mobilität angeboten und genutzt werden, einen wesentlichen Einfluss auf die Umwelt haben. Stellt man dem gegenüber die Analyse von Endris et al., liegt der maßgebliche Gestaltungsspielraum der Mobilitätslösungen in der Entwicklung dieser. Die Produktentwicklung hat also einen maßgeblichen Einfluss auf die Nachhaltigkeitserfüllung von Mobilitätslösungen und somit auf die Umwelt. Gleichmaßen werden Nachhaltigkeitsforderungen an die Entwicklung aus allen Phasen des Lebenszyklus definiert (Abbildung 2).

Der Verantwortungsbereich der Produktentwicklung erstreckt sich über den gesamten Lebensweg des Produktes und schließt die Erfüllung von Nachhaltigkeitsforderungen aus den einzelnen Lebensphasen mit ein. An dieser Stelle gilt es, Produktentwicklerinnen und -entwickler gezielt darin zu unterstützen, ihrer Verantwortung für eine Nachhaltige Entwicklung nachzukommen: Produkte müssen, um der globalen Herausforderung einer nachhalti-

gen Entwicklung gerecht zu werden, über den gesamten Lebensweg ressourcenschonend, umweltfreundlich, sozialverträglich und damit nachhaltiger werden. Wie das gelingen kann, ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

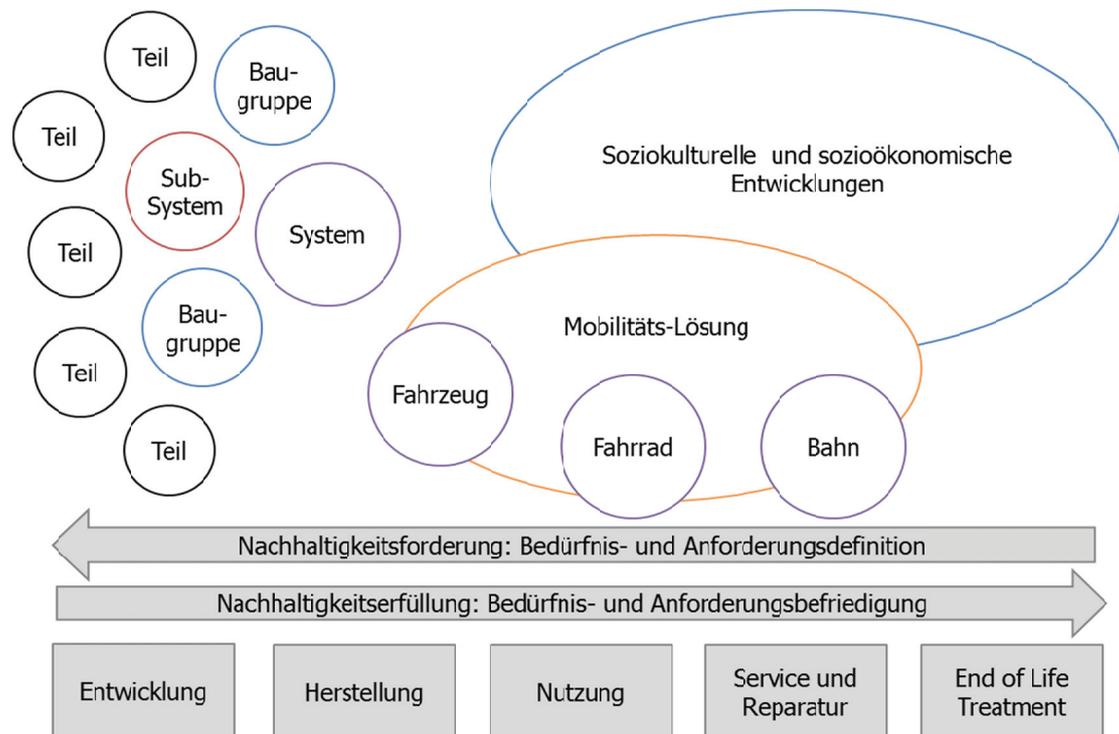


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Nachhaltigkeitsforderungen und Nachhaltigkeitserfüllung

1.2 Zielsetzung

Entlang eines Produktlebens tragen alle Beteiligten eine Verantwortung für die Nachhaltigkeit eines Produktes. So muss die Nutzung eines Produktes nicht genau der Annahmen des Produktkonzeptes in der Entwicklung entsprechen, die Entwicklung aber kann den größten Einfluss auf die Nachhaltigkeitspotentiale des Produktes nehmen (Hermann, et al. 2006, S. 93).

Die Umsetzung von Nachhaltigkeit beginnt somit im Produktentwicklungsprozess über die Umsetzung von Nachhaltigkeitsforderungen, die das Produkt widerspiegeln soll. Hier nehmen der Anspruch des Unternehmens und die genaue Definition der Nachhaltigkeitsforderungen aus dem zukünftigen Lebenszyklus eine zentrale Rolle ein (Stevel 2001). Mit zunehmendem Entwicklungsfortschritt (Produktdefinition, Konstruktion, Testen, Produktionsplanung) werden die Einflussmöglichkeiten zur Erfüllung von Nachhaltigkeitsforderungen eingeschränkt. Daraus erschließt sich unmittelbar die zentrale Frage: Wie kann die Nachhaltigkeit eines Produktes möglichst frühzeitig im Entwicklungsprozess abgeschätzt und beeinflusst werden?

Die vorliegende Arbeit erhebt den Anspruch, diese Einflussnahme den Produktentwicklern zu verdeutlichen und diese dazu zu befähigen, einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leis-

ten zu können. Dazu werden die verschiedenen Ebenen der Produktentwicklung betrachtet, im Einzelnen:

- I. Prozess und Organisation,
- II. Entwicklungsaktivitäten und -methoden,
- III. Informationstechnologien und Werkzeuge sowie
- IV. Informationsartefakte und -standards.

Die Wechselwirkungen und das Zusammenspiel zwischen den verschiedenen Ebenen und dem zu entwickelnden Produkt in einem Unternehmen bilden den Ausgangspunkt, ihr optimales Ineinandergreifen den Zielpunkt dieser Arbeit. Demgemäß wird folgenden Forschungsfragen nachgegangen:

1. Prozess und Organisation: Wie müssen Nachhaltigkeitsforderungen im Unternehmen kommuniziert werden und wie werden diese an Verantwortliche in der Produktentwicklung herangetragen?
2. Entwicklungsaktivitäten und -methoden: Welche Aktivitäten werden durchgeführt und welche Methoden benötigen Entwicklungsingenieure, um nachhaltige Entscheidungen treffen zu können?
3. Informationstechnologien und Werkzeuge: Welche Informationstechnologien und Werkzeuge können in welchem Zusammenhang die Produktentwicklung unterstützen?
4. Informationsartefakte und -standards: Welche Informationsartefakte und -standards müssen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte erstellt werden und wie können (Nachhaltigkeits-) Informationen sinnvoll vernetzt werden?

1.3 Forschungsansatz und Aufbau der Arbeit

Das methodische Vorgehen zur Beantwortung der im vorangegangenen Kapitel aufgestellten Forschungsfragen wurde an die „Design Research Methodology (DRM)“ von Blessing und Chakrabarti angelehnt (siehe Abbildung 3). Dieser Forschungsansatz umfasst verschiedene Phasen, die literaturgestützte und empirische Forschungszugänge miteinander vereinen und – je nach Forschungsaufgabe – eine unterschiedliche Ausprägung besitzen sowie unterschiedlich oft durchlaufen werden können (Blessing und Chakrabarti 2009, S 14ff.). Die im vorherigen Kapitel ausgeführten Forschungsfragen liegen allen Forschungsphasen zugrunde.

Kapitel 2 dient der Klärung der Forschungsabsicht. Ausgehend von einer Literaturanalyse zum Leitbild der nachhaltigen Entwicklung und der Analyse existierender Modelle und Theo-

rien zum Thema Nachhaltigkeit werden die Implikationen für die Erforschung des Themas aus Sicht der Produktentwicklung dargelegt. Darauf aufbauend wird – ebenfalls literaturgestützt – der Stand der Technik aufgearbeitet (Kapitel 3) und der Forschungsbedarf abgeleitet (Kapitel 4).

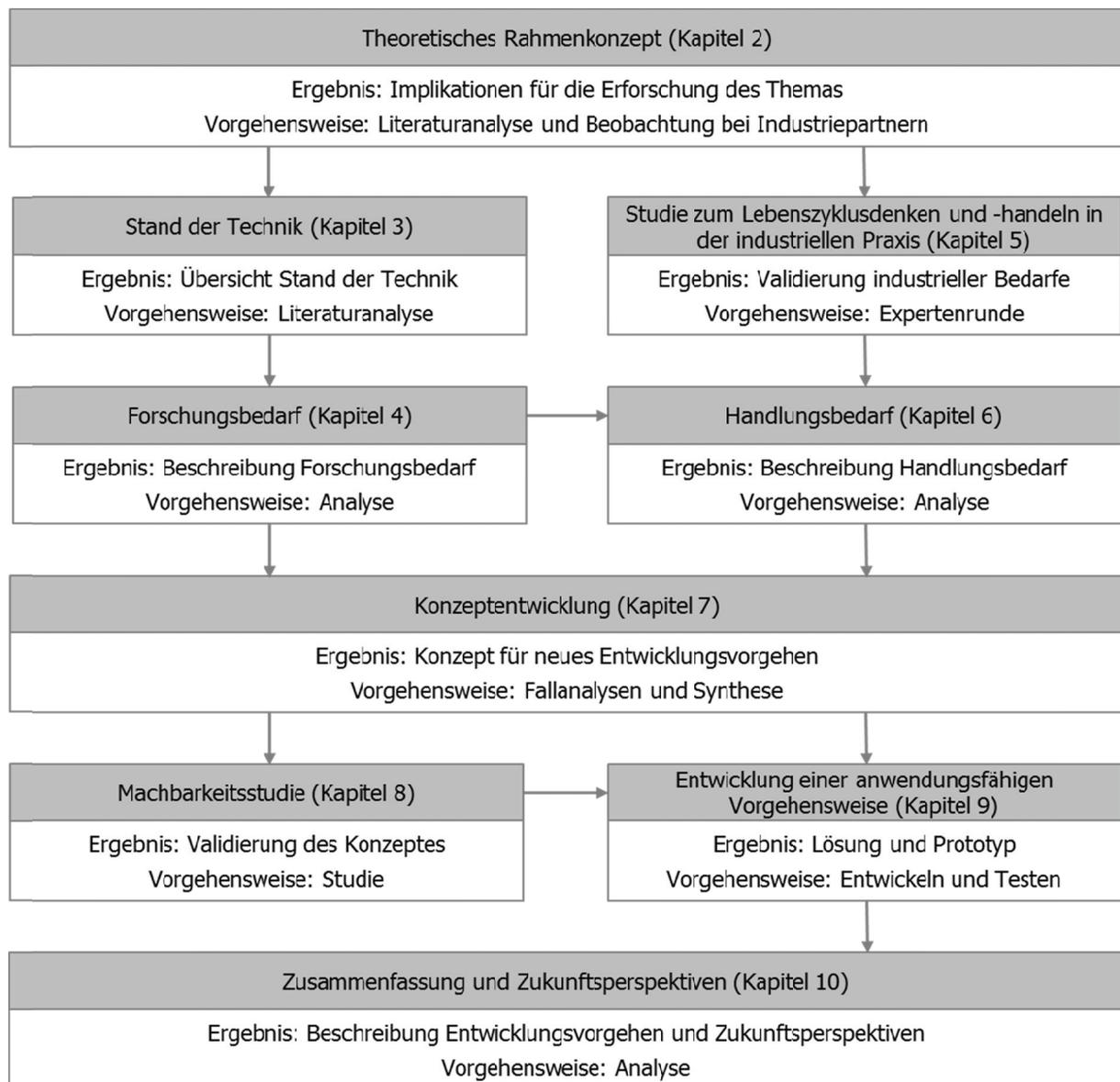


Abbildung 3: Aufbau der Arbeit mit Darstellung der erzielten Ergebnisse und der jeweiligen Vorgehensweisen

Eine empirische Erhebung in dieser Phase dient der Identifikation des tatsächlichen industriellen Handlungsbedarfs und komplementiert auf diese Weise die vorangegangenen Analysen (Kapitel 5 und 6). Kapitel 7 führt die Ergebnisse zu einem neuen Entwicklungsvorgehen zusammen. Dieses Entwicklungsvorgehen wird anschließend durch eine Machbarkeitsstudie validiert (Kapitel 8) und – aufbauend auf den Ergebnissen dieser Studie – zu einer anwendungsfähigen Vorgehensweise konkretisiert sowie prototypisch realisiert (Kapitel 9). Die Ar-

beit schließt mit einer Zusammenfassung und der Beschreibung von Zukunftsperspektiven (Kapitel 10) die Betrachtung des Themas „Wissensbasierte Entwicklung nachhaltiger Produkte“ ab.

2 Theoretisches Rahmenkonzept

Ingenieure legen die Eigenschaften und Merkmale von technischen Produkten fest und gestalten damit das Produkt für den gesamten Lebensweg. Die zunehmende Forderung der Gesellschaft nach einer globalen nachhaltigen Entwicklung bringt neue Herausforderungen für die Tätigkeiten des Ingenieurs mit sich: Es gilt, das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung mit dem Verständnis der Ingenieurstätigkeiten in Zusammenhang zu setzen. Dieser Schritt, der auch das grundlegende Verständnis der Ingenieurwissenschaften betrifft, wird im Folgenden vorgenommen. In Kapitel 2.1 wird die Forschungsarbeit positioniert. Kapitel 2.2 beschreibt das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung, während in Kapitel 2.3 auf konkrete Modelle und Theorien eingegangen wird. In Kapitel 2.4 wird die Verbindlichkeit von Nachhaltigkeit für Unternehmen vorgestellt und in Kapitel 2.5 auf den Beitrag der Ingenieurwissenschaften zur Umsetzung von Nachhaltigkeit eingegangen. Abschließend werden die Implikationen für die Erforschung des Themas in Kapitel 2.6 beschrieben.

2.1 Positionierung der Forschungsarbeit

Schon 1962 schrieb Morris Asimow in seinem Buch „Introduction to Design“, dass Produktentwicklungsprojekte stets eine Synthese von technischen, technologischen, menschlichen und ökonomischen Faktoren erfordern – und dass darüber hinaus der gesamte Lebenszyklus eines Produktes betrachtet werden muss. Seiner Auffassung nach muss bei jedem Entwicklungsprojekt der aktuelle Fortschritt stets mit den sozio-kulturellen und sozio-ökonomischen Bedürfnissen und Anforderungen aus dem gesamten Lebenszyklus abgeglichen und die Entwicklung gegebenenfalls den neuen Erkenntnissen angepasst werden. (Asimow 1962, S.3ff.)

Asimow beschrieb somit bereits in den 60er Jahren, dass die Synthese von technischen, technologischen, menschlichen und ökonomischen über den Lebenszyklus eines Produktes den Wert des Produktes ausmacht. Sein Verständnis über Synthese kann demzufolge als Teil der Wertschöpfung betrachtet werden.

Im klassischen Sinne wird Wertschöpfung mit industrieller Produktion gleichgesetzt, d.h. durch die Transformation natürlicher Ressourcen werden über Produktionsprozesse Produkte hergestellt, die die Bedürfnisse der Gesellschaft befriedigen sollen (Redlich 2011, S. 18f.). Dies greifen auch Spur und Krause zum Verständnis ihres Produktionssystems auf. Im Produktionssystem münden soziökonomische, soziotechnische und natürliche Umsysteme. Abbildung 4 zeigt die Zusammenhänge aus Sicht eines Produktionssystems auf. (Spur und Krause 1997, S. 37)

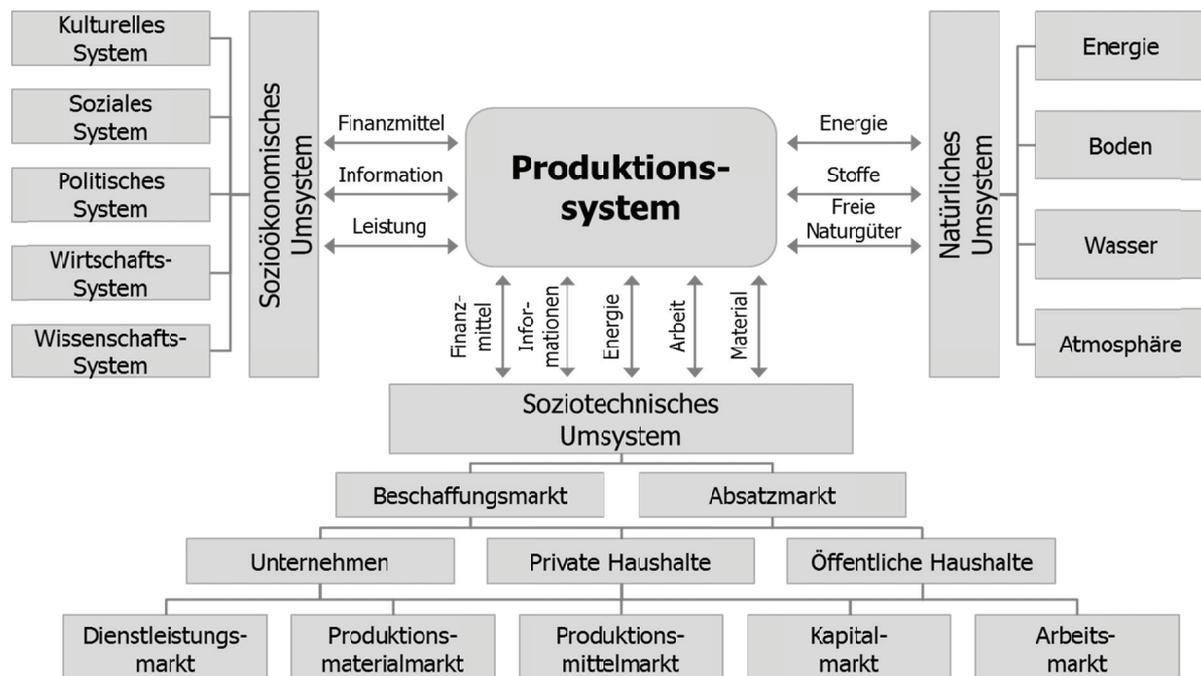


Abbildung 4: Produktionssystem (Spur und Krause 1997, S. 37)

Spur und Krause sehen die Produktentwicklung als Teil des Produktionssystems an. In Verbindung mit Asimows Synthese lässt sich die Bedeutung der Produktentwicklung für die Umsysteme erkennen. Dies bedeutet, dass durch die Produktentwicklung im Produktionssystem die soziökonomischen, natürlichen und soziotechnischen Umsysteme mitgestaltet werden.

Ueda et al. greifen diesen grundlegenden Gedanken auf und bringen ihn in Zusammenhang mit dem Thema Nachhaltigkeit. Dazu konstatieren sie: „In association with globalization and networking, every industry in this century is strongly required to contribute to sustainable development, but no solution can be obtained easily when considering the complexity and instability of the social systems. Additionally, maintaining sustainability often creates a dilemma between values of a whole society and values of individuals [...]. Therefore, to resolve this problem, more attention must be devoted to value creation mechanisms.“ (Ueda et al. 2009, S. 682)

Darüber hinaus wird von Ueda et al. hervorgehoben, dass die Synthese, wie sie auch schon Asimow beschrieb, den wesentlichen Treiber einer gesellschaftlich nachhaltigen Entwicklung darstellt. Die wesentlichen Herausforderungen sehen sie dabei in der Untersuchung und Umgestaltung von Wertschöpfungsmechanismen sowie in der damit verbundenen Entscheidungsfindung. (Ueda et al. 2009)

Vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Entwicklung werden die vorgestellten Ansätze von Ueda et al., Spur und Krause sowie Asimow für den Orientierungsrahmen der vorliegenden Arbeit ausgewählt (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Orientierungsrahmen der Arbeit

2.2 Leitbild der nachhaltigen Entwicklung

Der Begriff der Nachhaltigkeit tauchte erstmals 1713 in der Abhandlung *Sylvicultura Oeconomica* von von Carlowitz auf und erwies sich zunächst als prägend für die Forstwirtschaft. Der damals zunehmende Holzbedarf für Berg- und Hüttenwerke im Raum Freiberg, Sachsen, hatte zu einer so massiven Abholzung der Wälder der Region geführt, dass die Wirtschaft beinahe zum Erliegen kam. Von Carlowitz kam daraufhin zu dem Schluss, „man müsse [das Holz] ‚mit Behutsamkeit‘ nutzen, sodass ‚eine Gleichheit zwischen An- und Zuwachs und dem Abtrieb des Holzes erfolgt‘ und die Nutzung ‚immerwährend‘, ‚continuirlich‘ und ‚perpetuirlich‘ stattfinden könne.“ (Grober 1999, S. 98) Unter Berücksichtigung des Nachwachsens von Bäumen war von Carlowitz also bemüht, eine dauerhafte Nutzung der umliegenden Wälder zu ermöglichen und somit ökonomische Aspekte mit ökologischen Anforderungen in Einklang zu bringen. Damit war das Prinzip der Nachhaltigkeit weitgehend begründet. (Grundwald und Kopfmüller 2006; Grober 1999, S. 98ff.)

In den Jahren von der Industrialisierung bis Mitte des 20. Jahrhunderts wurde das Thema der Nachhaltigkeit aufgrund des anhaltenden wirtschaftlichen Aufschwungs und des technisch-wissenschaftlichen Fortschritts kaum thematisiert. Erst in den Jahren nach der Jahrhundertwende wurde den Menschen allmählich bewusst, dass Technik und Wirtschaft auf natürliche Ressourcen angewiesen sind und diese nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen. Der 1972 erschienene Bericht *Die Grenzen des Wachstums* (The Limits to Growth) des Club

of Rome, eine seit 1968 weltweit agierende Vereinigung von Wissenschaftlern, Industriellen und Politikern, die sich für eine nachhaltige Gestaltung der Zukunft der Menschheit einsetzt, zeigte, dass Bevölkerungswachstum, Nahrungsmittelherstellung, Industrialisierung, Ressourcenausbeutung und Umweltverschmutzung zu einem ökologischen – und damit verbunden auch ökonomischen – Kollaps führen würden, wenn kein Umdenken einsetzen würde. (Grundwald und Kopfmüller 2006; Meadows und Meadows 1972)

1983 nahm die UN-Kommission für Umwelt und Entwicklung (United Nations World Commission on Environment and Development) unter der Leitung der norwegischen Ministerpräsidentin Gro Harlem Brundtland ihre Arbeit auf und formulierte im so genannten Brundtland-Report von 1987 die viel zitierte Definition der Nachhaltigkeit: „Sustainable future is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.“ (WCED 1987)

Es heißt, eine nachhaltige Entwicklung sei eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der heutigen Generation befriedige, ohne die Möglichkeit der Bedürfnisbefriedigung von künftigen Generationen zu gefährden. Dazu müsse auf internationaler wie auch auf nationaler Ebene Verantwortung für zukünftige Generationen übernommen werden. Der Kommission gelang es – neben der reinen Definition der Nachhaltigkeit – erstmals, ein globales Entwicklungsleitbild für die Öffentlichkeit zu entwickeln, welches auch heute noch einen geeigneten Ausgangspunkt für strategische Planungen in sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Bereichen bietet. (WCED 1987; Grundwald und Kopfmüller 2006, Schmidt 2005)

Mit der 1992 international einberufenen Rio-Konferenz wurde das Leitbild des Brundtland-Reports in Handlungsfelder umgesetzt. Diese finden sich in folgenden vier Dokumenten wieder:

1. in der Agenda 21, in welcher die Ergebnisse des Brundtland-Reports in Ziele, Maßnahmen und Instrumente umgesetzt wurden,
2. in der Walderklärung, für eine nachhaltige Nutzung der Wälder der Erde,
3. in der Klimakonvention, für eine weltweite Reduzierung der Treibhausgase sowie
4. in der Konvention über die biologische Vielfalt, zum internationalen Arten- und Habitatschutz.

Trotz der internationalen Anerkennung und Bedeutung der Rio-Konferenz wurden keine verbindlichen Grenzwerte oder konkrete Strategien zur Umsetzung der vier Dokumente vereinbart. Dessen ungeachtet ging von ihr ein bis heute anhaltender Impuls aus. Dieser spiegelt sich beispielweise im Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung in Johannesburg, Südafrika

(2002) wieder (Grundwald und Kopfmüller 2006; Schmidt 2005). Hinzu kamen weitere Weltgipfel bis zum Jahr 2015. Außerdem ist die Agenda 21 Anknüpfungspunkt für weitere globale (z.B. NGOs) und lokale Initiativen (auf Staatenebene) auf dem Gebiet einer nachhaltigen Entwicklung.

Die Vereinten Nationen haben im Jahr 2000 mit ihren Millennium-Entwicklungszielen (Millennium Development Goals, MDG, siehe Anhang I), im Gegensatz zur Agenda 21, acht Entwicklungsziele deklariert, die bis 2015 erreicht werden sollten. So wurde ein Katalog grundsätzlicher, verpflichtender Zielsetzungen für alle UN-Mitgliedstaaten in den Bereichen Armut, menschliche Würde, Gleichberechtigung, Demokratie, ökologische Nachhaltigkeit und Frieden von den 189 Mitgliedsstaaten unterzeichnet. Im Vergleich zu früheren UN Entwicklungsdekaden sind die Ziele in Zusammenarbeit von Regierungen, internationalen Organisationen und Unternehmen erarbeitet worden. Außerdem sind die Zielsetzungen umfassender und konkreter als zuvor beschrieben. (UN 2010, S. 2f.)

Insbesondere die Ziele aus Punkt 7 für ökologische Nachhaltigkeit („Ensure environmental sustainability“) weisen einen thematischen Bezug zu dieser Arbeit auf. Unter ökologischer Nachhaltigkeit wird unter anderem folgendes verstanden:

- Die Grundsätze der nachhaltigen Entwicklung in der Politik und den Programmen der einzelnen Staaten verankern und die Vernichtung von Umweltressourcen eindämmen.
- Den Verlust der Biodiversität verringern, bis 2010 eine signifikante Drosselung der Verlustrate erreichen.
- Bis 2015 Halbierung des Anteils der Menschen ohne dauerhaft gesicherten Zugang zu hygienisch einwandfreiem Trinkwasser (von 65 Prozent auf 32 Prozent).
- Bis 2020 eine deutliche Verbesserung der Lebensbedingungen von mindestens 100 Millionen Slumbewohnern und -bewohnerinnen bewirken.

Letztendlich kann festgehalten werden, dass der Fokus der Millennium-Entwicklungsziele in der sozio-ökonomischen Entwicklung von Staaten (hier insbesondere Entwicklungs- und Schwellenländern) und Bevölkerungsgruppen liegt und es, trotz Einbindung von Unternehmen in die Ausarbeitung der Zielsetzungen, keine direkte Verbindung zur Unternehmensebene gibt. Dies liegt vor allem daran, dass die Millenniumserklärung keine Vorgehensweisen oder konkrete Vorschläge für die Operationalisierbarkeit ihrer Zielsetzungen hergibt.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Rio-Konferenz hat der 13. Deutsche Bundestag 1995 die Enquête-Kommission Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung eingesetzt. Im Abschlussbereich der

überfraktionellen Untersuchungskommission wurden drei Dimensionen für das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung identifiziert: die ökologische, die ökonomische und die soziale Dimension. (Deutscher Bundestag 1998)

Die ökologische Dimension umfasst den Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen wie Klima, Boden, Wasser und Luft, aber auch die Vielfalt der Arten- und Ökosysteme. Die Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen auch für nachfolgende Generationen kann, dem Abschlussbericht folgend, nur erreicht werden, wenn die Gesellschaft schonend im Umgang mit Ressourcen ist. (Deutscher Bundestag 1998)

Unter der ökonomischen Dimension wird die Zunahme und langfristige Sicherung des Wohlstands der Gesellschaft verstanden. Der Erhalt der Wirtschaft sowie die nachhaltige Sicherung der Wettbewerbs- und Marktfunktionen stellen in diesem Zusammenhang ein unverzichtbares Zwischenziel dar. (Deutscher Bundestag 1998)

Die soziale Dimension deckt die Forderungen nach zukunftssichernden Lebensstilen und gerechter Verteilungssysteme ab. Besonders die gerechte Verteilung von Wohlstand und Gütern steht hier im Mittelpunkt. (Deutscher Bundestag 1998)

Nach Ansicht der Kommission stehen die drei Dimensionen in Wechselbeziehungen zu einander und können dementsprechend nur dann einzeln betrachtet werden, wenn die anderen Dimensionen nicht völlig ausgeblendet werden. Fortwährend galt und gilt es, die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den Dimensionen zu beachten. (Deutscher Bundestag 1998)

Die bisherigen Entwicklungen zeigen auf, dass Nachhaltigkeit eine globale Aufgabe ist. Aufbauend auf den bis dato erzielten Ergebnissen sowie aus nationalen und internationalen politischer Bestrebungen wurden weitere Maßnahmen auf internationaler Ebene beschlossen. So verabschiedete die Vollversammlung der Vereinten Nationen im September 2015 die Agenda zu einer nachhaltigen Entwicklung für die kommenden 15 Jahre. Darin wurden 17 wesentliche nachhaltige Entwicklungsziele festgehalten (siehe Anhang II). Die Ziele stellen eine Weiterentwicklung der Millennium Development Goals aus dem Jahr 2000 dar. Während zum damaligen Zeitpunkt noch das übergeordnete Ziel der Halbierung der Armut in der Welt bis zum Jahr 2015 verfolgt wurde, nehmen die Sustainable Development Goals erstmalig auf Ebene der Vereinten Nationen das Thema Produktion auf. Als Ziel wird es ausgewiesen, nachhaltige Konsum- und Produktionsstrukturen sicherzustellen (im Original: „Goal 12. Ensure sustainable consumption and production patterns“). Dieses Ziel wird, wie in Abbildung 6 dargestellt, in acht Teilzielen untergliedert.

Goal 12. Ensure sustainable consumption and production patterns

12.1 Implement the 10-Year Framework of Programmes on Sustainable Consumption and Production Patterns, all countries taking action, with developed countries taking the lead, taking into account the development and capabilities of developing countries

12.2 By 2030, achieve the sustainable management and efficient use of natural resources

12.3 By 2030, halve per capita global food waste at the retail and consumer levels and reduce Food losses along production and supply chains, including post-harvest losses

12.4 By 2020, achieve the environmentally sound management of chemicals and all wastes throughout their life cycle, in accordance with agreed international frameworks, and significantly reduce their release to air, water and soil in order to minimize their adverse impacts on human health and the environment

12.5 By 2030, substantially reduce waste generation through prevention, reduction, recycling and reuse

12.6 Encourage companies, especially large and transnational companies, to adopt sustainable practices and to integrate sustainability information into their reporting cycle

12.7 Promote public procurement practices that are sustainable, in accordance with national policies and priorities

12.8 By 2030, ensure that people everywhere have the relevant information and awareness for sustainable development and lifestyles in harmony with nature

Abbildung 6: Detaillierung des Teilziels „Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen“ (im Original: „Goal 12. Ensure sustainable consumption and production patterns“ (Goal 12)) aus den Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen (UN 2015, S. 26f.)

Insbesondere die folgenden drei Teilziele betreffen produzierende Unternehmen (UN 2015, S. 26f.):

- Nachhaltige Bewirtschaftung und effiziente Nutzung der natürlichen Ressourcen bis zum Jahr 2030 erreichen (im Original: „12.2 By 2030, achieve the sustainable management and efficient use of natural resources“)
- Abfallaufkommen durch Prävention, Reduktion, Recycling und Wiederverwendung bis zum Jahr 2030 grundlegend reduzieren (im Original: „12.5 By 2030, substantially reduce waste generation through prevention, reduction, recycling and reuse“)
- Unternehmen, insbesondere große und transnationale Unternehmen, anregen, nachhaltige Methoden einzusetzen und Nachhaltigkeitsinformationen in ihr Reporting regelmäßig zu integrieren (im Original: „12.6 Encourage companies, especially large and transnational companies, to adopt sustainable practices and to integrate sustainability information into their reporting cycle“)

Die Entwicklung des Leitbildes für nachhaltige Entwicklung lässt sich folgendermaßen zusammenfassen: Ausgehend von einer lokalen Angelegenheit mit wirtschaftlicher Motivation hat sich über die Berücksichtigung ökologischer Aspekte und NGOs das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung herausgebildet. Das Leitbild bietet eine wesentliche Grundlage zur Entwicklung von Modellen und Konzepten, die aufzeigen, wie das Leitbild in verschiedene Bereiche (beispielsweise Politik und Wirtschaft, Bauingenieurwesen und Maschinenbau) integriert werden kann.

2.3 Modelle und Theorien einer nachhaltigen Entwicklung

Auf Basis der im vorherigen Kapitel beschriebenen historischen Entwicklungen haben sich in der Literatur vorrangig die so genannten Drei-Säulen-Konzepte – wobei jede Säule für eine Nachhaltigkeitsdimension steht – durchgesetzt (vgl. Ott und Döring 2011, S. 37ff.). Im englischsprachigen Raum hat sich analog dazu der Begriff Triple-Bottom-Line manifestiert (vgl. Serageldin 1995, S. 17). Verschiedene Ausprägungen der Drei-Säulen-Modelle werden in Kapitel 2.3.1 beschrieben.

Die Drei-Säulen-Modelle können als de facto Standard für das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung in Literatur und Alltag angesehen werden. Gelegentlich wird den drei Säulen noch eine weitere Dimension angefügt, wie zum Beispiel Wissen oder Kultur, je nach Einsatzzweck des Modells. Entsprechend argumentieren Ott und Döring, dass die Drei-Säulen-Modelle nur ein Provisorium auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung gewesen seien und durch spezifischere Modelle abgelöst werden müssen. Sie begründen ihre Einschätzung insbesondere damit, dass die Modelle aus politischen Überlegungen heraus motiviert entwickelt wurden (im Gegensatz zu wissenschaftlich fundierten Überlegungen). Das komplexe Thema einer nachhaltigen Entwicklung wurde also stark vereinfacht. Deutlich wird dies insbesondere dann, wenn es um die Integration und Interdependenzen der einzelnen Säulen geht: Eine Partialoptimierung in den einzelnen Säulen bzw. Dimensionen löst das eigentliche Problem der Integration – und somit einer nachhaltigen Entwicklung als Gesamtheit – nicht. Ott und Döring haben daraufhin die Theorie einer starken Nachhaltigkeit entwickelt. Die Theorie wird in Kapitel 2.3.2 beschrieben. (Ott und Döring 2011, S. 37ff.)

Aus produktionswissenschaftlicher Sicht hat sich Seliger mit der Integration der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit auseinandergesetzt. Er zeichnet die wertschöpfenden Faktoren Produkt, Prozess, Menschen, Organisation und Betriebsmittel über die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit ab. Damit wird das gleichzeitige Zusammenwirken der drei Nachhaltigkeitsdimensionen mit den produktionstechnischen Faktoren verdeutlicht. Seliger bezeichnet das

Modell als nachhaltiges Wertschöpfungsmodul. In Analogie zur Supply-Chain oder dem Lebensweg eines Produktes aus produktionstechnischer Perspektive (Entwicklung, Produktion, Distribution, Service und Wartung, Remanufacturing) ergibt die Kombination von mehreren Wertschöpfungsmodulen ein Wertschöpfungsnetzwerk. Der produktionstechnische Ansatz wird in Kapitel 2.3.3 beschrieben.

2.3.1 Drei-Säulen-Modelle

Analog zum magischen Dreieck des Projektmanagements für Produktentwicklungsprojekte, das aus den Dimensionen Zeit, Kosten und Qualität besteht, kann auch ein magisches Dreieck für die Nachhaltigkeit definiert werden (Abbildung 7). (vgl. Hanusch 2011, S 8f.)

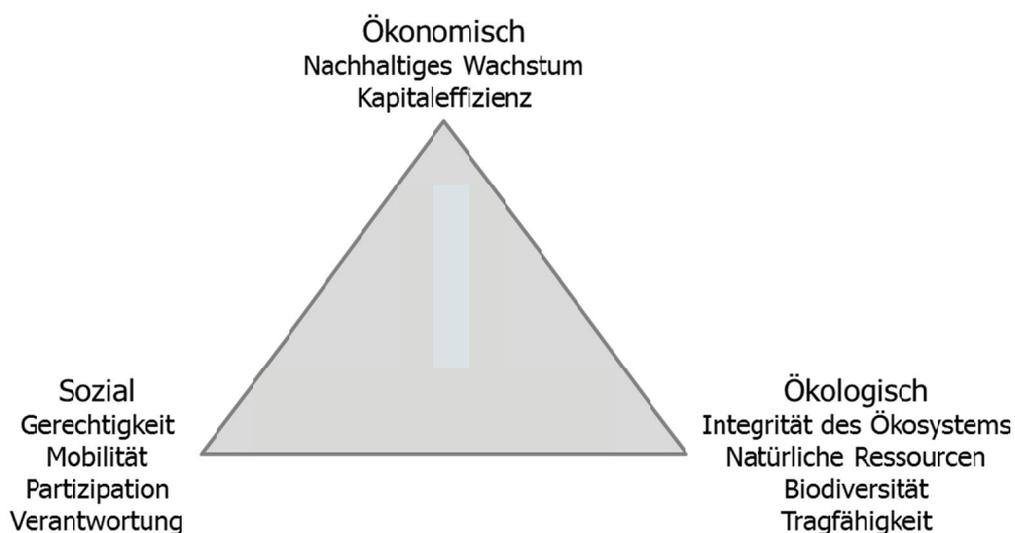


Abbildung 7: Das magische Dreieck der Nachhaltigkeit (nach Serageldin 1995, S. 17)

Ein häufig zitiertes „magisches Dreieck“ der Nachhaltigkeit stammt von Serageldin. Er beschreibt das Dreieck aus wirtschaftswissenschaftlicher Sicht wie folgt: „This triangle recognizes that whatever we are talking about in terms of sustainability has to be economically and financially sustainable in terms of growth, capital maintenance and efficiency of use of resources and investments. But it also has to be ecologically sustainable, and here we mean ecosystem integrity, carrying capacity, and protection of species. [...] However, equally important is the social side, and here we mean equity, social mobility, social cohesion.“ (Serageldin 1995, S. 17)

Auch wenn Serageldin die Verbundenheit der drei Nachhaltigkeitsdimensionen beschreibt und in einem Modell zusammenfasst, wird über die tatsächliche Integration der Dimensionen nichts ausgesagt. Die Dimensionen werden isoliert voneinander dargestellt. So bleibt beispielsweise die Frage offen, inwiefern nachhaltiges Wachstum einen Zielkonflikt mit sozialer

Mobilität und ökologischer Integrität darstellt oder ob die Ausprägungen miteinander uneingeschränkt vereinbar sind.

Eine weitere Entwicklung mit Bezug zum Nachhaltigkeitsdreieck stellen die so genannten Venn-Diagramme zur Nachhaltigkeit dar. Dabei wird jede Nachhaltigkeitsdimension über eine Menge als Kreis dargestellt. Die Schnittflächen in der Mitte ergeben den ausgeglichenen Zustand vollständiger nachhaltiger Entwicklung, während die Schnittflächen von lediglich zwei Kreisen einen bilateralen Zustand darstellen (und somit keine vollständige nachhaltige Entwicklung repräsentieren). Die Venn-Diagramme erweitern das magische Dreieck bilden die Zielkonflikte, die zwischen den einzelnen Dimensionen auftreten können, ab. So wird zum Ausdruck gebracht, dass eine nachhaltige Entwicklung stets mit dem Abwägen der drei Dimensionen einhergeht. In der Literatur hat sich eine Vielzahl verschiedener Venn-Diagramme herausgebildet, die aber grundlegend mit dem in Abbildung 8 dargestellten Diagramm übereinstimmen. Es werden folgende Zusammenhänge verdeutlicht (in Anlehnung an Rodriguez et al. 2002; Loveridge 2009, S. 219):

- Ökologisch – ökonomisch: Dimensionen müssen nebeneinander existenzfähig sein können; z.B. Energieeffizienz, staatliche Unterstützung, Anreize zur Nutzung natürlicher Ressourcen
- Ökonomisch – sozial: Dimensionen müssen gerecht und angemessen zueinander sein; z.B. Wirtschaftsethik, Arbeitsrecht und -bedingungen, faire Handelsbedingungen
- Sozial – Ökologisch: Dimensionen müssen verträglich miteinander sein bzw. sich gegenseitig unterstützen; z.B. lokale und globale Verantwortung für natürliche Ressourcen und Umweltgerechtigkeit

Hanusch beschreibt die Interaktion der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit miteinander wie folgt: „Ökonomische Aktivitäten finden im Dienst der Gesellschaft statt, ökologische Nachhaltigkeit ist wiederum Teil der gesellschaftlichen Ziele und Werte und die biophysische Umwelt wiederum bietet die Potenziale für eine fortdauernde Stützung von Wirtschaft und Gesellschaft.“ (Hanusch 2011, S 8)

Damit wird das enge Zusammenspiel der drei Dimensionen deutlich. Ebenfalls wird deutlich, dass nicht alle Dimensionen auf einmal optimal gestaltet werden können, denn der Versuch, eine Verbesserung einer Dimension herbeizuführen, kann sich möglicherweise negativ auf eine oder gar auf die beiden anderen Dimensionen auswirken.

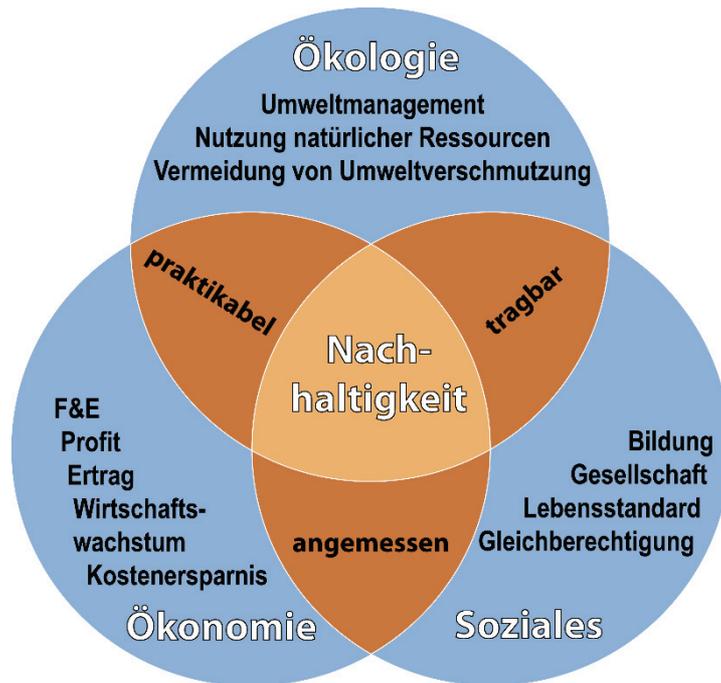


Abbildung 8: Venn-Diagramm zum Drei-Säulen-Konzept der Nachhaltigkeit (in Anlehnung an Rodriguez et al. 2002; Loveridge 2009, S. 219)

2.3.2 Theorie starker Nachhaltigkeit

Ott und Döring sehen das Thema Nachhaltigkeit vor allem als ethnische Herausforderung zum Umgang mit sozialgesellschaftlichen und natürlichen Rahmenbedingungen auf der Erde an. In diesem Zusammenhang entwickelten sie eine Gesamtkonzeption einer nachhaltigen Entwicklung, die im Wesentlichen auf die Arbeit von Herman Daly aufbaut: Die Theorie der starken Nachhaltigkeit. (vgl. Daly 1996; Ott und Döring 2011)

Die Theorie gründet im Wesentlichen auf den Ansatz, dass das menschliche Wirtschaftssystem ein Teil der umfassenderen Geo- und Biosphäre ist. Die Vertreter der Theorie nehmen an, dass die Produktion im menschlichen Wirtschaftssystem Sachkapital hervorbringt. Analog dazu bringt die Biosphäre Naturkapital hervor. Weil beide Systeme zusammenwirken, kann von einer Komplementarität zwischen Sach- und Naturkapital ausgegangen werden. Weiterhin kann, aufgrund der Komplementarität und der fortschreitenden Zerstörung von Naturkapital auf der Erde, davon ausgegangen werden, dass das Naturkapital den limitierenden Faktor der Produktion darstellt. (Ott und Döring 2011, S. 145ff.)

In Anlehnung an Klauer (Klauer 1998, S. 146ff.) und Bartmann (Bartmann 2001, S. 50ff.) legen Ott und Döring in ihrer Gesamtkonzeption für eine nachhaltige Entwicklung ein Achtebenen-Modell vor (Ott und Döring 2011, S. 41 und S. 344f.):

1. Idee der Nachhaltigkeit
2. Konzeption starker Nachhaltigkeit

3. Regelwerk
4. Leitlinien (Effizienz, Suffizienz, Resilienz)
5. Handlungsfelder
6. Zielsysteme
7. Spezialkonzepte
8. Umsetzungsinstrumente

Auf der ersten Ebene, der Idee der Nachhaltigkeit (1), wird inter- und intragenerationelle Gerechtigkeit beschrieben. Hier gilt der Grundsatz und die Forderung aus dem Brundtland-Bericht, dass die heutige Generation dafür sorgen muss, dass zukünftige Generationen ihre Lebensbedingungen gestalten sollen dürfen. Die inter- und intragenerationelle Gerechtigkeit bildet das Normativ für die nachfolgende Ebene der Konzeption (2). Die Konzeption erschließt sich aus der Theorie der starken Nachhaltigkeit: Ein funktionierendes Ökosystem ist die Grundlage für ein gesellschaftliches System. Darüber bildet sich ein ökonomisches System ab. Dies bedeutet, dass die Konzeption in der Reihenfolge Ökologie, Soziales und Ökonomie argumentiert werden muss. Der Konzeption liegen wiederum generelle Regelwerke (z.B. Constant Natural Capital Rule¹, Investitionsregeln, Managementregeln) zugrunde, die auf den jeweiligen Fall spezifisch angepasst und präsentiert werden müssen. Die Kernebenen werden dann anhand von zwei operationalen Brückenebenen, bestehend aus den drei Leitlinien Effizienz, Suffizienz, Resilienz (4) sowie der Bestimmung von Handlungsfeldern (5), an drei umsetzungsorientierte Ebenen angebunden. Die drei umsetzungsorientierten Ebenen umfassen dabei fallspezifische Zielsysteme (6) und normative Spezialkonzepte (7) und werden durch Umsetzungsinstrumente (8) wie beispielsweise Implementation und Monitoring unterstützt. (Klauer 1998, S. 146ff.; Bartmann 2001, S. 50ff.; Ott und Döring 2011, S. 41 und S. 344f.)

2.3.3 Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke

Seliger definiert über die Triple-Bottom-Line ein weiteres Venn-Diagramm, das so genannte Wertschöpfungsmodul (siehe Abbildung 9). Damit wird die unternehmerische Perspektive von produzierenden Unternehmen auf das globale Thema einer nachhaltigen Entwicklung projiziert. Denn neben der Fragestellung, wie die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit in Einklang gebracht werden können, werden nun zusätzliche Fragen nach dem Wie, Was, Womit, Wann und Wo und Wer gestellt. Dies zeigt auf, dass vor dem Hintergrund der drei Nachhal-

¹ Dem Verständnis einer starken Nachhaltigkeit nach, soll Naturkapital über die Zeit hinweg konstant gehalten werden (Constant Natural Capital Rule¹). Im Gegensatz dazu kann im Konzept schwacher Nachhaltigkeit Natur- durch Sachkapital prinzipiell unbegrenzt substituiert werden. In diesem Konzept kommt es nur darauf an, dass der Durchschnittsnutzen dauerhaft erhalten wird. (Dalal-Clayton & Sadler 2014, S. 233ff.)

tigkeitsdimensionen die Dimensionen Prozessabläufe, Produktalternativen, Betriebsmittel und Organisation von den einzelnen Akteuren berücksichtigt und aktiv gestaltet werden müssen. (Seliger 2012)

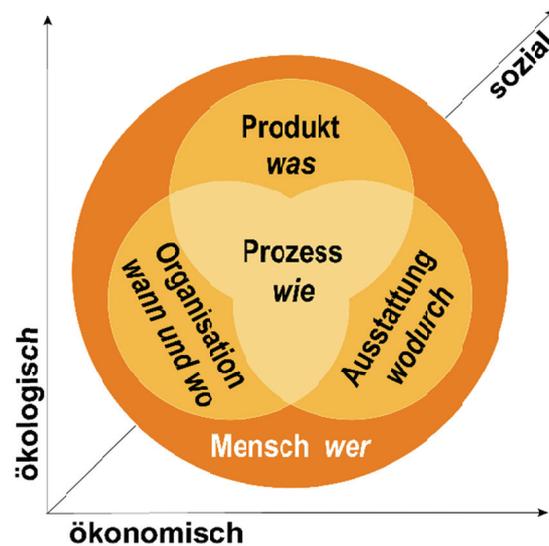


Abbildung 9: Wertschöpfungsmodul über der Triple-Bottom-Line (nach Seliger 2012)

2.4 Verbindlichkeit einer nachhaltigen Entwicklung aus Unternehmenssicht

Das vorangegangene Kapitel hat gezeigt, dass sich eine nachhaltige Entwicklung immer im Spannungsfeld der Handlungsweisen von verschiedenen Akteuren, beispielsweise Unternehmen und Staaten, bewegt. Entscheidend ist dabei, wie verbindlich bzw. verpflichtend die Handlungsweisen zwischen den Akteuren sind. Dementsprechend wird der Grad der Verbindlichkeit in

- Muss (z.B. Gesetzgebung),
- Soll (z.B. Richtlinien) und
- Kann (z.B. freiwillige Verpflichtungen) unterschieden (Schäfers 2008, S. 31f.).

In der Zeit des Wirtschaftswunders in Deutschland prägte Ludwig Erhard insbesondere mit dem Zweiklang von Freiheit und Verantwortung eine besondere Art der Verbindlichkeit, seine Konzeption der Sozialen Marktwirtschaft: „Der Einzelne muß seine Freiheit nutzen und die dazugehörige Verantwortung übernehmen; der Staat muß die Freiheit des Einzelnen schützen und die individuelle Verantwortung einfordern.“ (Erhard 2009, S.X)

Damit zeigt Ludwig Erhard auf, was sich als eine systembedingte Antinomie von Freiheit und Verantwortung beschreiben lässt. Verlagert sich das Gewicht des einen Elements, ändert sich das Gewicht des anderen zwangsläufig: Der Kontext muss ständig neu verhandelt werden, d.h. der Staat muss den Individuen einen Rahmen bieten, in denen sie Verantwortung über-

nehmen können. Hierbei gilt es stets, ein Gleichgewicht zwischen Freiheit und Verantwortung zu schaffen.

Angesichts der gegenwärtigen globalen Entwicklungen hat diese Idee kaum an Gültigkeit verloren. Auf einer abstrakten Ebene lassen sich die beiden Elemente, Freiheit und Verantwortung, einfach verbinden. Es bleibt allerdings die Frage, wie es mit der Verbindlichkeit zwischen Freiheit und Verantwortung eigentlich aussieht, insbesondere vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Entwicklung, in der soziale und ökologische Aspekte den ökonomischen Aspekten gleichgestellt sind.

Freiheit und Verantwortung bezieht sich aber nicht nur auf das Zusammenwirken von Staaten und Einzelnen. Der Einzelne ist Teil der Gesellschaft (vgl. Ritsert 2000, S. 23ff.) und kann im Verständnis einer Organisation auch Teil eines Unternehmens sein. Somit können Unternehmen als ein soziotechnisches System (vgl. Ropohl 2009, S. 140ff.) innerhalb einer Gesellschaft verstanden werden. Damit gehen Interaktion und Abhängigkeit zwischen Staat, Gesellschaft und Unternehmen einher, die sich in der Verbindlichkeit zwischen Freiheit und Verantwortung widerspiegeln. Die Verbindlichkeit lässt sich somit als das entscheidende Element einer nachhaltigen Entwicklung darstellen. Sie beschreibt das Zusammenwirken von Unternehmen und Gesellschaft vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Entwicklung. (vgl. Schaltegger et al. 2013)

Weil produzierende Unternehmen Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind, wird im Folgenden die Verbindlichkeit aus Unternehmenssicht dargestellt. Grundsätzlich muss in eine unternehmensexterne und -interne Sichtweise der Verbindlichkeit unterschieden werden (Abbildung 10, in Anlehnung an Epstein und Roy 1998).

Die unternehmensexterne Sicht beschreibt die äußeren Abhängigkeiten eines Unternehmens: Unternehmen agieren im Rahmen von Gesetzgebung und (Produkt-) Compliance, müssen Normen und Standards einhalten, stellen sich einer öffentlichen Meinung, ringen um ihre Marktposition und müssen sich gegenüber Wettbewerbern durchsetzen. Unter der unternehmensinternen Sicht wird das Unternehmen als soziotechnisches System verstanden, das eine strategische Ausrichtung besitzt, um der unternehmensexternen Verbindlichkeit gerecht zu werden.

Aus interner Sicht sehen sich Unternehmen sind einem ständigen Wandel ausgesetzt, der sich in Produkt- und Prozessinnovationen widerspiegelt. Gleichmaßen gilt es stets, die Kosten zu senken, bei gleichzeitiger sozialer Verantwortung gegenüber seinen eigenen Mitarbeitenden einerseits und gegenüber der Gesellschaft andererseits. Weitere Verbindlichkei-

ten für eine nachhaltige Entwicklung aus unternehmensinterner Sicht sind die Wirkung und der Ruf des Unternehmens auf seine unternehmensinternen und -externen Stakeholder. Die interne Verbindlichkeit ist somit vom jeweiligen Unternehmen abhängig und wird in einer Studie in Kapitel 5 näher untersucht. Im Folgenden wird detaillierter auf externe Verbindlichkeit eingegangen.



Abbildung 10: Verbindlichkeit zwischen Unternehmen und Gesellschaft für eine nachhaltige Entwicklung aus Unternehmenssicht

Der höchste Grad der Verbindlichkeit wird durch Gesetze geschaffen (Grad der Verbindlichkeit: Muss). Im Rahmen der Produktentwicklung müssen produzierende Unternehmen zahlreiche gesetzliche Regelungen einhalten. Dies führt wiederum dazu, dass die Lösungsräume – und damit die Freiheit des Unternehmens in der Gestaltung seiner Produkte – eingeschränkt werden. Aus traditioneller Sicht heraus wurden insbesondere qualitäts- und sicherheitsrelevante Produkteigenschaften gesetzlich geregelt. Die gesetzlichen Regelungen variieren in Umfang, Gültigkeit und Detaillierung je nach Land oder Staatengemeinschaft. In Deutschland wurden seit Mitte der 70er Jahre ökologische Anforderungen zunehmend Bestandteil von Gesetzen und Verordnungen. So heißt es beispielsweise im Bundes-Immissionsschutzgesetz² von 1974: „Zweck dieses Gesetzes ist es, Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen.“ (BImSchG 2013)

² Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge; Ausfertigungsdatum 15.03.1974, Neugefasst vom 17.05.2013, Letzte Änderung und Inkrafttreten am 31.08.2015.

Der Geltungsbereich umfasste dabei neben der Errichtung und dem Betrieb von Anlagen u.a. auch die Beschaffenheit und die Ausrüstung von Kraft-, Schienen-, Luft-, und Wasserfahrzeugen (BImSchG 2013). Damit wurde von staatlicher Seite der Lösungsraum bei der Gestaltung von Produkten durch die Vorgabe von produktgruppenspezifischen Verboten und Grenzwerten zum Wohle von Mensch, Tier und Umwelt reguliert.

Mit dem Kreislaufwirtschaftsgesetz von 1996 und in dessen Neuauflage von 2012 wurde erstmals das Konzept der lebenszyklusweiten Produktverantwortung in einem Gesetzestext aufgegriffen. Es ist als ein Rahmenwerk zu verstehen, das Unternehmen eine umfassende Produktverantwortung nach dem Verursacherprinzip auferlegt. U.a. wird dort über die Gestaltung des Produktes gesprochen. Mit dem Gesetz soll die Schonung der natürlichen Ressourcen gefördert werden.

Als weiteres Beispiel kann die Europäische Verordnung REACH³ (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) angeführt werden (EG 1907/2006). Seit 2007 besitzt REACH zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien gleichermaßen und unmittelbar in allen Mitgliedstaaten der Europäischen Union Gültigkeit.

Im Bereich der Automobilindustrie hat sich schon vor dem Jahr 2007 ein Material-Datenbank-System als Standard etabliert. Das International Material Data System (IMDS) enthält die jeweils in den Bauteilen verwendeten Werkstoffe und Einsatzstoffe. Damit steht ein Instrument zur Verfügung, mit dem Inhaltsstoffe in Erzeugnissen erfasst werden können. Vor dem Inkrafttreten von REACH wurde dieses Instrument jedoch dezidiert nur auf Produkte angewendet, die von den externen Regelungen und Gesetzen in den verschiedenen Absatzmärkten betroffen waren. Es beschränkte sich auch nur auf Stoffe, die von den Lieferanten vorgegeben waren. Zum Erfüllen der REACH-Anforderungen wurde die bisherige Materialerfassung in der IMDS-Datenbank so erweitert, dass sie auf alle Produkte anwendbar ist und dadurch deren Materialzusammensetzung gesetzeskonform sicherstellt. (Lüskow und Heitmann 2010, S. 16ff.)

Eine mittlere Verbindlichkeit (Grad der Verbindlichkeit: Soll) wird beispielsweise in Form von Richtlinien ausgedrückt. So hat das Europäische Parlament und der Europäische Rat im Jahr 2009 eine Richtlinie zur „Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an

³ 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, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission. (EG 1907/2006)

die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte“ verabschiedet (2009/125/EG). Sie ist auch informell unter dem Titel „Ökodesignrichtlinie“⁴ bekannt. In Artikel 1, Absatz 2, heißt es dazu: „Diese Richtlinie sieht die Festlegung von Anforderungen vor, die die von den Durchführungsmaßnahmen erfassten energieverbrauchsrelevanten Produkte erfüllen müssen, damit sie in Verkehr gebracht und/oder in Betrieb genommen werden dürfen. Sie trägt zur nachhaltigen Entwicklung bei, indem sie die Energieeffizienz und das Umweltschutzniveau erhöht und zugleich die Sicherheit der Energieversorgung verbessert.“ (2009/125/EG) Es wird vorgeschlagen, wie Produkte energieeffizient gestaltet werden müssen und welchen Beitrag sie dadurch zum Erreichen von Nachhaltigkeitszielen leisten.

Seit 2009 bildet die Richtlinie den Rahmen für verbindliche Ökodesign-Mindestanforderungen an Produkte. Die Richtlinie setzt dabei bereits in der Phase der Produktgestaltung an, da hier der Großteil der von Produkten ausgehenden Umweltwirkungen vorbestimmt wird. Auf Basis der Richtlinie werden von der Europäischen Kommission unter Einbindung von Industrie-, Verbraucher- und Umweltverbänden sowie den Mitgliedstaaten produktspezifische Verordnungen erarbeitet. Die produktspezifischen Verordnungen legen verbindliche Mindestanforderungen an das umweltgerechte Produktdesign bestimmter Produktgruppen fest. Derzeit sind für 22 Produktgruppen Durchführungsverordnungen in Kraft. (BMW 2016)

Aus unternehmerischer Sicht stellen die öffentliche Meinung und die Haltung von NGO zu den Unternehmen und deren Produkten einen geringeren Grad der Verbindlichkeit dar. Dennoch stellt diese Art von Verbindlichkeit eine besondere Situation vor dem Hintergrund von Marktposition und Wettbewerb gegenüber den Käufern von Produkten dar. So wirkt sich beispielsweise das Image von Unternehmen unmittelbar auf Kaufmotive und -entscheidungen der potentiellen Kunden aus (vgl. Kirchner 2003, S. 112f.).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Gesetze zunächst die Freiheit der Unternehmen einschränken. Hier spiegelt sich der Widerspruch wider, wenn alle Dimensionen der Nachhaltigkeit gleichermaßen betrachtet werden sollen. Aus ökonomischer Sicht, also im Sinne der Freiheit des Unternehmens, sollten Unternehmen ihren Standort in einer globalisierten Welt frei wählen können. Gleichzeitig stellt sich die Frage nach der sozialen Verantwortung gegenüber Mitarbeitenden und auch dem Staat, wenn Unternehmen ihren Standort verlegen. Darüber hinaus gibt es bezüglich der ökologischen Dimension der Nachhaltigkeit globale Unterschiede in der Gesetzgebung. Hier können Unternehmen im Sinne der Freiheit wählen, an welche Gesetze sie sich binden wollen. Dies lässt gleichermaßen eine Aussage

⁴ Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. (2009/125/EG)

über die ökologische Verantwortung der Unternehmen offen. Es lässt sich also festhalten, dass die Gesetzgebung nur einen Beitrag dazu leisten kann, die individuelle Verantwortung der Unternehmen einzufordern.

2.5 Beitrag der Ingenieurwissenschaften zur nachhaltigen Entwicklung

Geht es darum, ein nachhaltiges Produkt zu entwickeln bzw. mit einem Produkt einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung zu leisten, so kann aus den Ingenieurwissenschaften aus folgenden Perspektiven beigetragen werden (vgl. Kapitel 2.1):

- Produktionssysteme (nach Spur und Krause 1997),
- Synthese (nach Asimow 1962) und
- Wertschöpfung (nach Ueda et al. 2009).

Um den Beitrag der Ingenieurwissenschaften zu einer nachhaltigen Entwicklung beschreiben zu können, wird das Beispiel der Mobilität wieder aufgegriffen. Aus traditioneller Sicht heraus liegt die Verantwortung des Unternehmens bei der Entwicklung und Herstellung von Systemen, wie z.B. Fahrzeugen. Wird nun der gesamte Lebenszyklus als Ressourcenstrom angesehen, erweitert sich der Verantwortungsbereich auf die Phasen der Rohstoffverarbeitung und ggf. der Rohstoffgewinnung auf der einen und den Phasen der Nutzung, des Services und der Reparatur sowie des End of Life Treatments auf der anderen Seite (Abbildung 11). Ein Automobilhersteller, der dafür Sorge trägt, dass seine Fahrzeuge so entwickelt und hergestellt werden, dass sie in jeder Phase das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung unterstützen und sicherstellen, kann als nachhaltig angesehen werden.

Gleichermaßen ist der Verkauf von Fahrzeugen wesentlicher Bestandteil des Geschäftsmodells von Automobilherstellern. Durch die Erweiterung des Geschäftsmodells, z.B. vom Verkauf von Fahrzeugen hin zum Car Sharing, wird der Verantwortungsbereich auf die Phasen der Nutzung, des Services und der Reparatur ebenfalls erweitert.

2.5.1 Nachhaltiges Produkt

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze von Definitionen eines nachhaltigen Produktes, deren Gemeinsamkeiten bzw. Überschneidungen die Ableitung folgender, für diese Arbeit gültiger, Definition erlauben: Ein nachhaltiges Produkt zeichnet sich dadurch aus, dass es während seines gesamten Lebenswegs eine nachhaltige Entwicklung durch seine Merkmale und Eigenschaften unterstützt und sicherstellt (vgl. Lützkendorf 2007, S. 375). Entscheidend ist demnach, nach welchen Werten das Produkt entwickelt wird. Diese Werte spiegeln

sich in Zielkriterien im Entwicklungsprozess wieder und haben sich über die letzten Dekaden verändert.

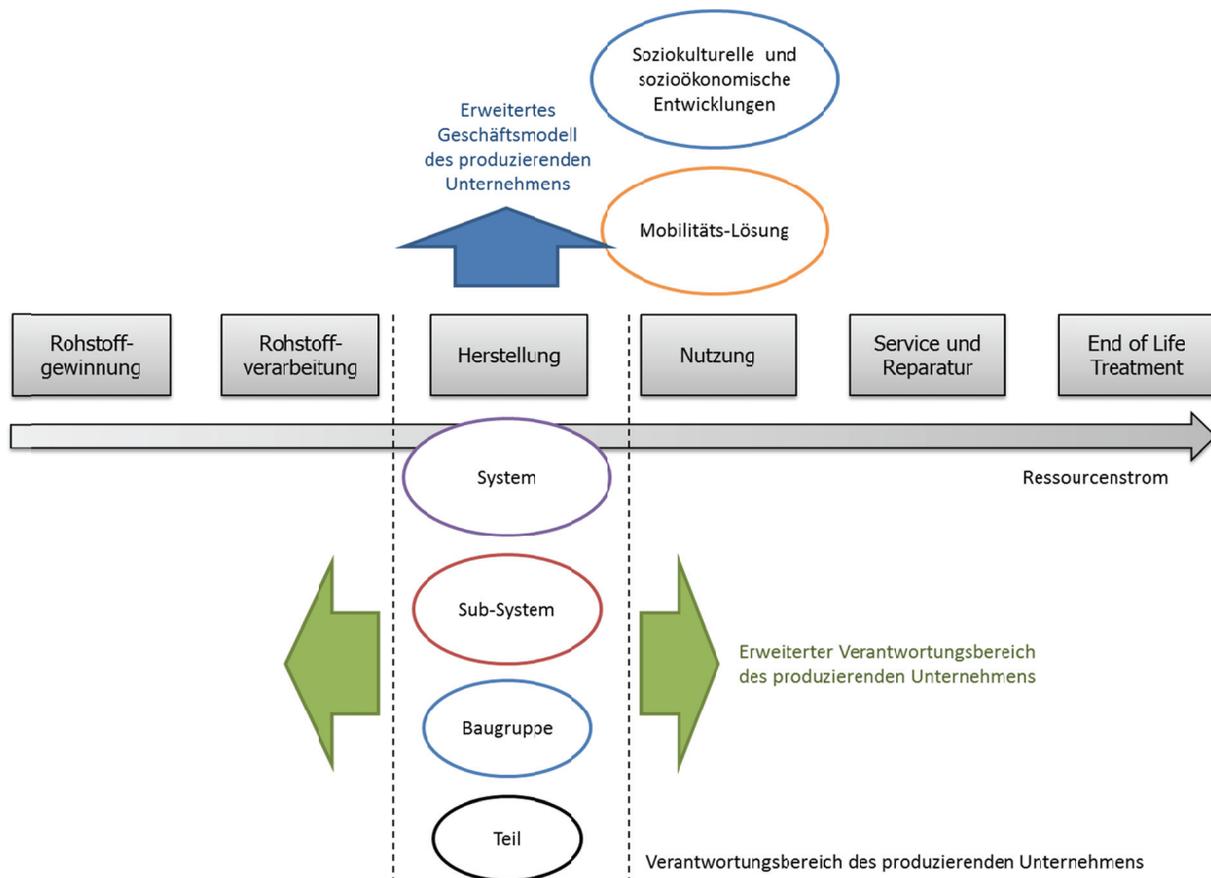


Abbildung 11: Erweiterung des Verantwortungsbereichs und des Geschäftsmodells von produzierenden Unternehmen aus dem Bereich der Mobilität

Neben der reinen Funktionserfüllung von Produkten und damit verbunden die Bedürfnisbefriedigung der Nutzer liegen die klassischen Kriterien der Produktentwicklung in den Entwicklungskosten, der Entwicklungszeit und der Produktqualität. Ulrich und Eppinger beschreiben die Erweiterung der klassischen Kriterien um Produktionskosten und Entwicklungsfähigkeit (Ulrich und Eppinger 2008). Ueda et al. definieren zusätzlich noch soziale und ökologische Kriterien, die zukünftig stärker in der Produktentwicklung berücksichtigt werden müssen (Ueda et al. 2009). Ausgehend von den klassischen über die erweiterten bis hin zu den zukünftigen Kriterien steigt die Komplexität im Entwicklungsprozess (vgl. Abbildung 12). Es müssen neue bzw. erweiterte Prozesse, Methoden und Informationen in die Synthese zur Nachhaltigkeitsbeeinflussung und -beurteilung einfließen.

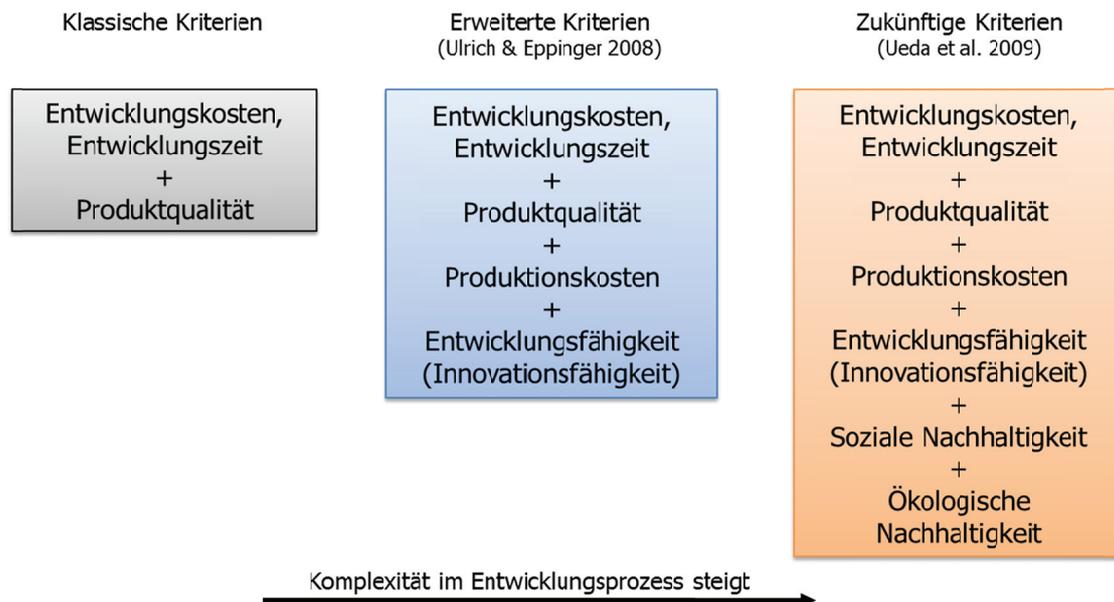


Abbildung 12: Kriterien für erfolgreiche Entwicklungsprozesse

Der Verlauf von Nachhaltigkeitsbeurteilung und Nachhaltigkeitsbeeinflussung verhält sich analog zu Kostenbeurteilung und Kostenbeeinflussung, d.h. durch die zunehmende Konkretisierung und Gestaltung des Produktes (und nach dem Simultaneous Engineering Ansatz auch die Festlegung der Fertigungsart und des Fertigungsortes) werden die Möglichkeiten zur Nachhaltigkeitsbeurteilung mit fortschreitender Entwicklungszeit geringer. Dagegen steigen die Möglichkeiten, eine detaillierte Nachhaltigkeitsbeurteilung durchzuführen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich ein nachhaltiges Produkt über die Synthese von folgenden drei Faktoren definiert:

1. Den Prozess (u.a. Produktionssysteme und Geschäftsprozesse)
2. Die Organisation (u.a. Mitarbeiter und dem Geschäftsmodell)
3. Den Lebenszyklus (u.a. Wertschöpfung und Nutzer)

Um dies zu erreichen, müssen die Merkmale und Eigenschaften des Produktes entsprechend der drei Faktoren gestaltet werden. Außerdem kann festgehalten werden, dass die größten Potentiale zum Sicherstellen einer nachhaltigen Entwicklung in der Produktentwicklung liegen. In Analogie zur Kostenbeeinflussung und -beurteilung (vgl. Ehrlenspiel et al. 2013, S. 13) in der Produktentwicklung steht dazu die Möglichkeit der Nachhaltigkeitsbeeinflussung und -beurteilung (vgl. Abbildung 13).

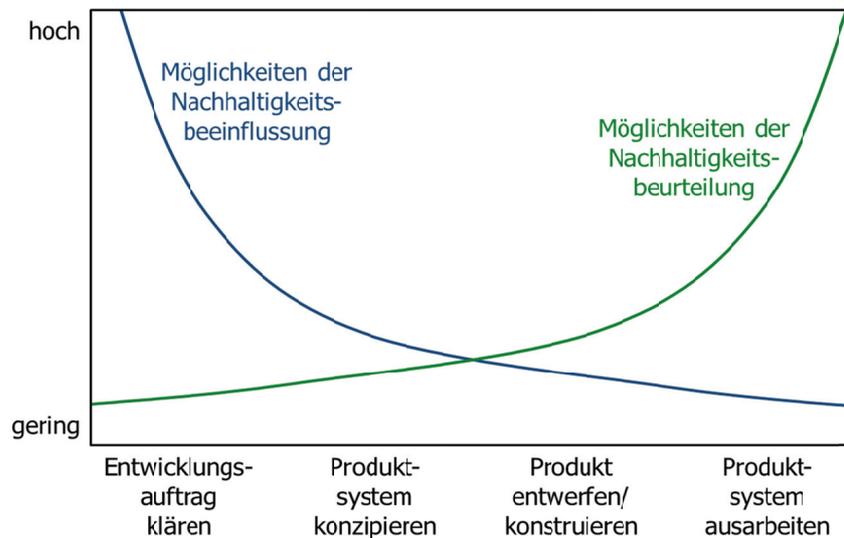


Abbildung 13: Möglichkeit der Nachhaltigkeitsbeeinflussung und -beurteilung in Analogie zur Kostenbeeinflussung und -beurteilung in der Produktentwicklung

2.5.2 Nachhaltigkeitspyramide

Ausgehend vom Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung bildet das Lebenszyklusdenken die Grundlage für die weitere Betrachtung der Nachhaltigkeit innerhalb eines Unternehmens (Abbildung 14, in Anlehnung an Herrmann 2009, S. 117ff.).

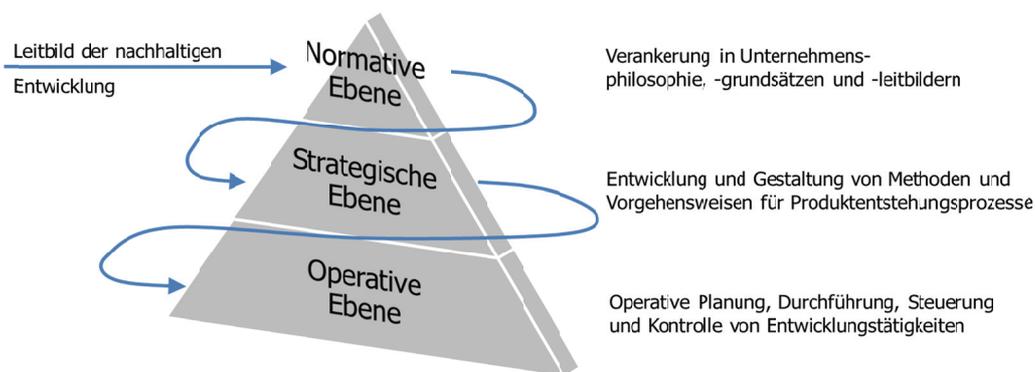


Abbildung 14: Ebenen der Nachhaltigkeit im Unternehmen

So bilden Lebenszyklusdenken und Lebenszykluskonzepte die normative Grundlage für ein lebenszyklusorientiertes Handeln innerhalb eines Unternehmens. Dies bedeutet, dass zunächst das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung in das Wertesystem des Unternehmens integriert werden muss. Damit geht hauptsächlich die Übernahme von nachhaltigen Grundsätzen und Prinzipien (wie beispielsweise das Drei-Säulen-Konzept) in die Unternehmensphilosophie einher. Weiterhin werden nachhaltige Zielsetzungen in Unternehmensgrundsätzen und -leitbildern verankert. Zum Entwickeln nachhaltiger Produkte ist diese Verankerung besonders wichtig, weil das Produkt (-design) dazu beiträgt, die Nachhaltigkeitsvorstellungen der Unternehmen an seine Kunden und Käufer zu kommunizieren. Das Produkt verkörpert in

seiner Ausarbeitung, seinen Funktionen und im Erscheinungsbild die Überzeugungen, Wertevorstellungen und Visionen der Unternehmen (in Anlehnung an Petersen 2012, S. 69).

Auf der strategischen Unternehmensebene müssen Nachhaltigkeitsforderungen, die auf normativer Ebene festgehalten wurden, in die Gestaltung von Methoden und Abläufen von Entwicklungsprozessen integriert werden (z.B. Integration von „Design for Sustainability“ in unternehmensinterne Entwicklungsmethoden und Prozessleitfäden).

Auf der operativen Ebene müssen Entwicklungstätigkeiten auf die übergeordneten Nachhaltigkeitsforderungen abgestimmt und in Einklang mit Methoden und Handlungsanweisungen gebracht werden. Damit einher geht die Durchführung, Steuerung und Kontrolle von Entwicklungsprojekten hinsichtlich der drei Nachhaltigkeitsdimensionen. Dies darf durchaus als besondere Herausforderung verstanden werden.

2.5.3 Status quo

Aus Unternehmenssicht spiegelt ökonomisch nachhaltiges Handeln das Grundverständnis des Unternehmens wieder. Zugleich sichert es das Fortbestehen des Unternehmens. Unternehmen mit Forschungs- und Entwicklungsabteilungen bestehen nur dann fort, wenn das entwickelte Produkt oder die neue Dienstleistung auf dem Markt erfolgreich oder zumindest entwicklungs- und herstellungskostendeckend ist. Folglich wird der Wert eines Produktes fast ausschließlich am Markterfolg gemessen. Neben einer rein betriebswirtschaftlichen Betrachtung entstehen aus dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung heraus zusätzliche Werte, auf die Unternehmen zunehmend eingehen müssen. Diese Werte sind hauptsächlich aus der Gesellschaft heraus motiviert. Aus den Megatrends⁵ Globalisierung, Bevölkerungswachstum, Ressourcenknappheit und Klimawandel wächst in der Gesellschaft zunehmend ein Nachhaltigkeitsempfinden (Smith 2010). Unternehmen müssen dieses Empfinden aufgreifen und ihre Produkte entsprechend entwickeln, damit ihre Kunden zumindest erhalten bleiben, wenn gleich nicht sogar weitere gewonnen werden können.

Im Folgenden wird der Status quo auf den drei Ebenen dargelegt. Auf der normativen Ebene lässt sich erkennen, dass viele Unternehmen, insbesondere Konzerne aber auch KMU, das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung bereits integriert haben. Beispielhaft werden die Definitionen von drei Unternehmen in Tabelle 1 angeführt. Sie zeigen auf, dass Unternehmen nachhaltige Werte und Ziele auch nach außen kommunizieren.

⁵ Der Begriff des Megatrends wird durch John Naisbitt schon seit über 30 Jahren geprägt. Durch die Analyse der Gegenwart projizierte er Bilder der Zukunft und beschrieb damit zukünftige Entwicklungen. Diese Bilder sind über Jahrzehnte hinweg gültig und beschreiben anhaltende Veränderungen mit tiefgreifenden Veränderungen für Gesellschaft und Umwelt. (vgl. Naisbitt 1982)

Unternehmen	Definition
Trumpf GmbH + Co. KG (Werkzeugmaschinen)	„TRUMPF steht zu seiner Verantwortung für nachfolgende Generationen und handelt daher langfristig orientiert. [...] Als Hochtechnologieunternehmen legen wir unsere Produkte, Prozesse und unsere Infrastruktur auf minimalen Ressourcenverbrauch aus. Unseren Kunden ermöglichen wir, dadurch Wettbewerbsvorteile zu erzielen und gleichzeitig die Umwelt zu schonen.“ (Trumpf 2013)
Henkel AG und Co. KGaA (Konsumgüter)	„Eine Balance zwischen wirtschaftlichem Erfolg, Schutz der Umwelt und gesellschaftlicher Verantwortung anstreben – diese Grundeinstellung [...] spiegelt sich in unseren Unternehmenswerten wider. Wir verfolgen das Thema Nachhaltigkeit langfristig und unternehmerisch in all unseren Aktivitäten entlang der Wertschöpfungskette.“ (Henkel 2013)
BMW Group (Automobilbau)	„Die Strategie der BMW Group ist auf langfristiges profitables Wachstum ausgelegt. [...] Dabei berücksichtigt das Unternehmen konsequent die Prinzipien der Nachhaltigkeit und bezieht nicht nur wirtschaftliche, sondern auch soziale und ökologische Aspekte in alle Entscheidungen und Prozesse mit ein. Anspruch der BMW Group ist es, das Leitbild der Nachhaltigkeit zu konkretisieren und in die täglichen Geschäftsabläufe zu integrieren.“ (BMW 2013)

Tabelle 1: Integration des Leitbildes der nachhaltigen Entwicklung in die normative Unternehmensebene

Auf der strategischen Ebene lässt sich erkennen, dass eine Integration von Nachhaltigkeitsforderungen in Methoden und Arbeitsweisen größtenteils erfolgt ist. Der Grad der Implementierung variiert allerdings von Unternehmen zu Unternehmen und von Branche zu Branche. Ein Indikator für die Integrationsanstrengungen ist der legislative Druck, der über entsprechende Gesetzgebung und Nachweispflichten erzeugt wird. Darüber hinaus lässt sich erkennen, dass einige Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil für sich erkannt haben, wenn sie besser sind, als es die Gesetzgebung vorgibt. Dies kann bei einigen Unternehmen durchaus als Trend verstanden werden, zumindest in der Kommunikation nach außen.

Am Beispiel der Mercedes-Benz Car Group zeigen Finkbeiner et al. und Ruhland et al. auf, wie auf das Thema Nachhaltigkeit in Bezug auf Umweltschutz in der Mobilitätsbranche eingegangen wird. Auf der normativen Ebene wird das Thema Umweltschutz in die Unternehmensebene

mensphilosophie zur langfristigen Wertsteigerung verankert. Auf strategischer Ebene folgen Lösungen aus dem Bereich Design for Environment (DfE). Diese werden in Methoden und Vorgehensweisen für den Produktentstehungsprozess aufgenommen. Auf der operativen Ebene werden Lebenszyklusbewertungen nach internationalem Standard durchgeführt (DIN EN ISO 14044⁶). Abbildung 15 zeigt das Zusammenspiel von Prozess, Projektorganisation und informationstechnische Unterstützung auf. (Ruhland et al. 2004, Finkbeiner et al. 2006)

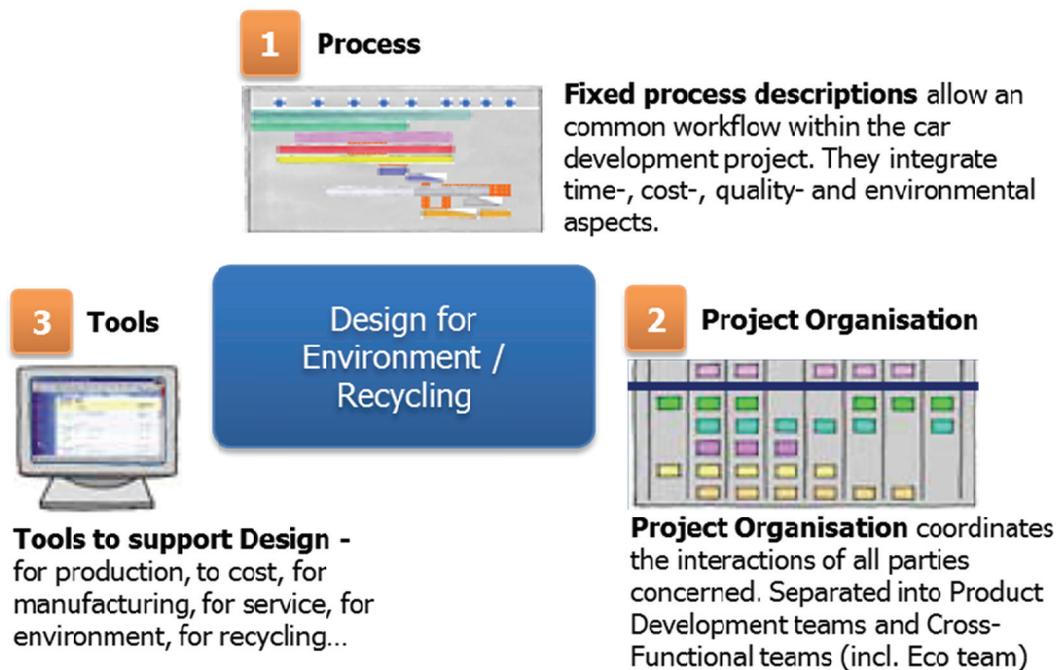


Abbildung 15: Integration auf der strategischen Ebene am Beispiel der Mercedes-Benz Car Group (nach Ruhland et al. 2004)

Die Schwierigkeiten im Umgang mit Nachhaltigkeitsforderungen in der Produktentwicklung zeigen sich erst auf der operativen Ebene. In Analogie zur strategischen Ebene wurde auch hier hauptsächlich aufgrund von legislativem Druck gehandelt. Es werden zunehmend Metriken in Entwicklungsprojekte integriert, die zum einen Nachhaltigkeitsziele definieren und zum anderen einen Nachweis über das Erreichen der Ziele messbar machen sollen.

An dieser Stelle lässt sich das Beispiel des Product Sustainability Index von Ford anführen: Seit 2002 analysiert Ford seine neuen Fahrzeugmodelle nach acht Kernattributen über den voraussichtlichen Lebensweg. Die Kernattribute lassen sich als Entwicklungsmetriken verstehen; dazu gehören CO₂, weitere Emissionen, Werkstoffauswahl (Allergie getesteter Innenraum, nachhaltige Materialien), aktive/passive Sicherheit, Geräusch-Emissionen im Fahrbetrieb, Mobilitätskapazität (Größe) und die Betriebskosten über einen Zeitraum von drei Jah-

⁶ DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (Ausgabe 2006-10)

ren. Abbildung 16 stellt den Vergleich zwischen verschiedenen Ford Galaxy Modellen anschaulich dar. (Ford 2007, S. 4ff.)

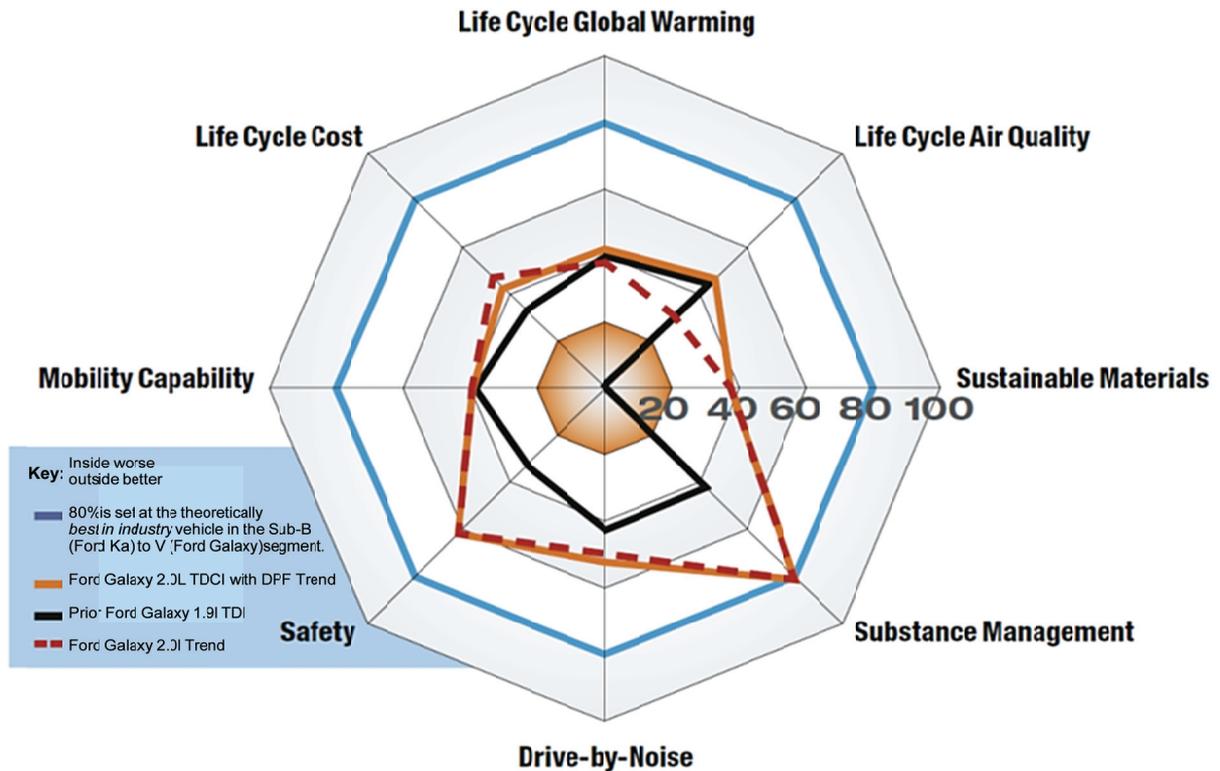


Abbildung 16: Metriken im Entwicklungsprozess am Beispiel des Ford Product Sustainability Index (Ford 2007, S. 28)

Dies setzt neben dem Einsatz geeigneter Methoden und Vorgehensweisen in der Entwicklung auch einen hohen Aufwand durch Know-how-Erwerb, eine hohe Informationsqualität und -verfügbarkeit, eine routinierte Anwendungserfahrung der Methoden und Vorgehensweisen sowie eine entsprechende Integration in informationstechnische Systeme zum Unterstützen der Entwicklungsaktivitäten voraus.

Am Beispiel der CO₂-Reduktion für Automobile lässt sich der Status quo in der operativen Ebene beschreiben. In der Automobilindustrie fordert die Legislative der Europäischen Union eine Reduktion der CO₂-Emissionen von durchschnittlich 95 Gramm pro Kilometer ab dem Jahr 2020. Um diese Ziele erreichen zu können, wurden bei der Entwicklung des VW Passat folgende Stellgrößen identifiziert (nach Schwarzer 2014, S. 14, vgl. Abbildung 17): Antrieb, Gewicht, Rollwiderstand und Aerodynamik.

Für die Stellgröße des Antriebs setzen die Ingenieurinnen und Ingenieure gleichermaßen auf effizientere Dieselmotoren und auf die Hybridisierung des Fahrzeugantriebs. Hierbei ergeben sich zwei Herausforderungen: Zum einen müssen die Dieselmotoren eine höhere Leistungs-

dichte erreichen und zum anderen wird eine neue Technologie eingeführt, die im Gesamtfahrzeug, also im höheren System, verbaut werden muss. (Schwarzer 2014, S. 14)

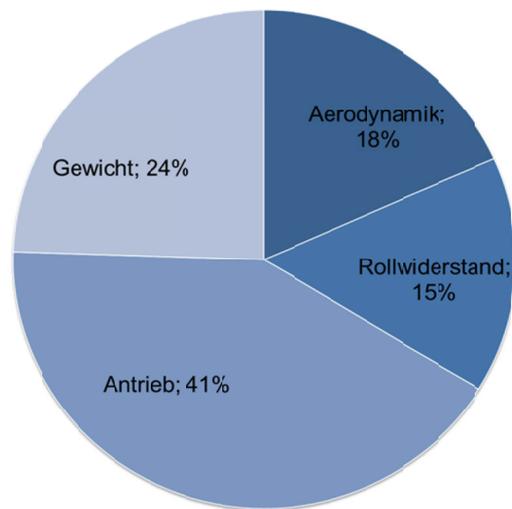


Abbildung 17: Stellgrößen zur CO₂-Reduktion in der Fahrzeugentwicklung am Beispiel von (Schwarzer 2014, S. 14)

Darüber hinaus muss das Gewicht, eine weitere Stellgröße in der Entwicklung, des Gesamtfahrzeugs reduziert werden. Hier stehen die Ingenieurinnen und Ingenieure vor der Herausforderung, die Kundenanforderungen nach mehr Ausstattungsfülle und Sicherheit mit einem reduzierten Gewicht in Einklang zu bringen. Eine höhere Ausstattungsfülle und ein erhöhtes Sicherheitsbedürfnis (z.B. passive Sicherheit in Form von höheren Karosseriesteifigkeiten) tragen zunächst zu einer Gewichtserhöhung bei. Gewichtsreduktionen können nur im Detail erreicht werden, beispielsweise durch den Einsatz leichterer Materialien und geometrischen Strukturen. (Schwarzer 2014, S. 14)

Über die Stellgrößen Rollwiderstand und Aerodynamik lassen sich ebenfalls die CO₂-Emissionen reduzieren (Schwarzer 2014, S. 14). So wird beispielsweise das Gesamtfahrzeug niedriger konstruiert, um über eine geringere Stirnfläche einen besseren c_w -Wert⁷ zu erreichen. Im Bereich der Rollwiderstände und Fahrzeugaerodynamik gibt es jedoch noch mehr Faktoren, wie beispielsweise die Durchströmung des Fahrzeugs zur Kühlung von Aggregaten, die dazu beitragen, CO₂-Emissionen zu reduzieren (vgl. Schütz 2013).

Die Herausforderung liegt nun auf der operativen Entwicklungsebene, entsprechende Lösungen zu schaffen. Hier muss das Zusammenspiel zwischen Nachhaltigkeitsbeeinflussung und -

⁷ Der c_w -Wert ist ein Strömungswiderstandskoeffizient, der den Strömungswiderstand eines umströmten Körpers angibt. Je geringer der Wert ist, desto geringer ist der berechnete Strömungswiderstand. (Diekmann und Rosenthal 2014, S. 80)

beurteilung im operativen Entwicklungsprozess gelebt werden. Dabei tun sich zwei wesentliche Herausforderungen auf:

1. Eine ineffektive Informationssammlung und -vernetzung zur Nachhaltigkeitsbeeinflussung (und auch teilweise zur Nachhaltigkeitsbeurteilung) sowie
2. Eine ineffiziente Nutzung neuer Konzepte und Methoden zur Entwicklung nachhaltiger Produkte aus der Wissenschaft.

Derzeit ist nicht klar, wie die Unternehmen mit den Herausforderungen umgehen und auf welche Lösungen sie zurückgreifen werden. An dieser Stelle wird auf Kapitel 5 verwiesen, in dem eine Studie zum Umgang mit vorgestellt wird. Außerdem wird in dem Kapitel auf entsprechende unternehmerische Lösungsansätze eingegangen.

2.6 Implikationen für die Erforschung des Themas

Die vorangegangenen Betrachtungen zeigen auf, dass der größte Forschungs- und Handlungsbedarf in der operativen Umsetzung des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung in Unternehmen besteht. Hier stehen insbesondere die strategische Ebene, auf der Methoden und Vorgehensweisen entwickelt und etabliert werden, und die operative Ebene, in der Entwicklungsprojekte geplant, durchgeführt und kontrolliert werden, im Fokus. Darüber hinaus lässt sich feststellen, dass die verschiedenen Ebenen, bestehend aus

- I. Prozess und Organisation,
- II. Entwicklungsaktivitäten und -methoden,
- III. Informationstechnologien und Werkzeuge und
- IV. Informationsartefakte und -standards

im Unternehmen im Zusammenspiel betrachtet werden müssen und eine Lösung über alle Aspekte hinweg geschaffen werden muss. Die bisherige Betrachtung zeigt auch drei Hürden zur Erforschung des Themas auf, die unmittelbar miteinander zusammenhängen:

- Das Handlungsfeld zwischen der höchsten Ebene einer nachhaltigen Entwicklung, wie sie beispielsweise in der Theorie der starken Nachhaltigkeit beschrieben wird, und der Umsetzung dieser in Eigenschaften und Merkmale von Produkten auf einer detaillierten Ebene unterliegt komplexen Zusammenhängen von überstaatlicher bis hin zur unternehmensindividuellen Ebene.
- Zwischen Wissenschaft und Praxis gibt es eine Diskrepanz beim Fortschritt des Einsatzes von Lösungen auf den verschiedenen Unternehmensebenen. In der Wissen-

schaft existieren für die verschiedenen Ebenen teilweise ausgearbeitete und validierte Lösungen, die aber in der Praxis nicht eingesetzt werden.

- Einerseits werden in der Wissenschaft allgemeingültige Lösungen vermisst, die sich auf praxisrelevante spezifische Fälle anpassen lassen. Andererseits gibt es auch keine genauen Problemdefinitionen aus der industriellen Praxis, aus denen wiederum Forschungsarbeiten abgeleitet werden können.

Bezüglich der Prozesse und Organisation (I) stellt sich heraus, dass die größten Hürden im Identifizieren und Kommunizieren von Nachhaltigkeitsforderungen liegen. Hier scheint es nicht klar zu sein, welche Nachhaltigkeitsinformationen an wen in der Produktentwicklung auf welche Art und Weise herangetragen werden müssen. Ferner umfasst das Thema Nachhaltigkeit mehrere verantwortliche Bereiche, die dazu gebracht werden müssen, zusammen zu arbeiten. Daraus lässt sich die erste Forschungsfrage ableiten: Wie müssen Nachhaltigkeitsforderungen im Unternehmen kommuniziert werden und wie werden diese an Verantwortliche in der Produktentwicklung herangetragen?

Bezüglich der Entwicklungsaktivitäten und -methoden (II) lässt sich erkennen, dass hier noch Potential in der Nutzung von wissenschaftlichen Methoden und Werkzeugen sowie im Erwerb von Know-how zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten auf Seiten der Produktentwickler besteht. Insbesondere das Thema Entscheidungsfindung mit entsprechender Unterstützung zum Bewerten und Abwägen zwischen Lösungsalternativen spielt hier eine bedeutende Rolle. Daraus lässt sich die zweite Forschungsfrage ableiten: Welche Aktivitäten werden durchgeführt und welche Methoden benötigen Entwicklungsingenieure, um nachhaltige Entscheidungen treffen zu können?

Bezüglich der Informationstechnologien und Werkzeuge (III) kann festgehalten werden, dass Entwicklungsaktivitäten grundsätzlich durch informationstechnische Systeme unterstützt werden. Der genaue Einsatz von entsprechenden Technologien und Werkzeugen ist allerdings unternehmensabhängig. Darüber hinaus erfordern Entwicklungsprojekte mit unterschiedlichen Nachhaltigkeitsforderungen den Einsatz verschiedener IT-Systeme und Datenbankverbindungen. Daraus lässt sich die dritte Forschungsfrage ableiten: Welche Informationstechnologien und Werkzeuge können in welchem Zusammenhang die Produktentwicklung unterstützen?

Bezüglich der Informationsartefakte und -standards (IV) ergibt sich ein unklares Bild über die effektive und effiziente Sammlung und Vernetzung von Informationen zur Nachhaltigkeitsbeeinflussung und -beurteilung. Es muss herausgefunden werden, welche Nachhaltigkeitsinformationen aus Lebenszyklus- und Unternehmenssicht in den Entwicklungsprozess integriert

werden müssen und wie diese mit den existierenden Entwicklungsinformationen zusammengeführt werden können. Daraus lässt sich die vierte Forschungsfrage ableiten: Welche Informationsartefakte und -standards müssen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte erstellt werden und wie können (Nachhaltigkeits-) Informationen sinnvoll vernetzt werden?

Den Forschungsfragen muss mit unterschiedlichen Methoden zur Beantwortung dieser begegnet werden. Die nachfolgenden Kapitel zeigen auf, an welchen Stellen Literaturanalyse (vgl. Kapitel 3), empirische Erhebung (vgl. Kapitel 5) und Konzeptentwicklung (Kapitel 7) und Machbarkeit (vgl. Kapitel 8) durchgeführt wurden. Darüber hinaus entstand eine prototypische Ausarbeitung (Kapitel 9).

3 Stand der Technik

Im vorherigen Kapitel wurde deutlich, dass das Thema nachhaltige Entwicklung als Unternehmensaufgabe verstanden wird, sich die Umsetzung von Nachhaltigkeitsforderungen in Produkte aber noch als Herausforderung darstellt. In Kapitel 3.1 wird zunächst auf das Lebenszyklusdenken und die verschiedenen Vorgehensweisen für Produktentwicklungsprozesse eingegangen. Nach einer Begriffsbestimmung und Einordnung erfolgt die Darstellung der relevanten Forschungsarbeiten auf dem Gebiet. Darüber hinaus wird der Begriff der Wissens- und Informationstechnologien für Produktentwicklungsprojekte in Kapitel 3.2 definiert und eingeordnet. Im Anschluss daran erfolgt die Darstellung der relevanten Forschungsarbeiten auf dem Gebiet. Diese Betrachtungen bilden die Grundlage zur Definition des Forschungsbedarfs.

3.1 Lebenszyklusdenken und Produktentstehungsprozesse

3.1.1 Begriffsbestimmung und Einordnung

Laut United Nations Environment Programme wird das Lebenszyklusdenken wie folgt definiert: "Life cycle thinking is essential to sustainable development. It is about going beyond the traditional focus on production site and manufacturing processes so to include the environmental, social, and economic impact of a product over its entire life cycle. Extended Producer Responsibility and Integrated Product Policies mean that the producers can be held responsible for their products from cradle to grave and therefore, should develop products, which have improved performance in all stages of the product life cycle [...]." (UNEP 2007, S.12).

Beim Lebenszyklusdenken spielt insbesondere das Konzept von der „Wiege bis zur Bahre“ eine zentrale Bedeutung für die ökologische Nachhaltigkeit von Produkten und Dienstleistungen. Es ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung von durchgängigen Lieferketten (engl. Supply Chains), angefangen von der Rohstoffgewinnung und deren Veredelung, über Herstellung und Verwendung eines Produkts bis hin zur Abfallwirtschaft. Auf diese Weise kann aufgezeigt werden, in welcher Phase welche ökologischen Verbesserungen erzielt werden

können. Die Erweiterung der Systemgrenzen beim Lebenszyklusdenken über den gesamten Lebenszyklus stellt einen grundlegenden Unterschied zwischen Lebenszyklus-Betrachtung und bisherigen Umweltanalyseansätzen dar, die nur eine oder zwei Lebensphasen (z.B. „Abfall-Minimierung“ und „Abfall-Entsorgung“ berücksichtigten). (vgl. Azapagic et al., 2003)

Es ist offensichtlich, dass ein umfassenderes Lebenszyklusdenken von grundlegender Bedeutung für die Identifikation von nachhaltigen Lösungen ist. So muss auch der Fokus von einer rein ökologischen Betrachtung auf alle Dimensionen der Nachhaltigkeit ausgeweitet werden. Nach Jensen wird unter Lebenszyklusdenken die Erweiterung der klassischen Wertschöpfungskette, bestehend aus Produktentwicklung, Produktion und Distribution, auf das gesamte Produktleben verstanden. Der Ansatz lässt sich auf die nachgelagerten Produktlebensphasen Nutzung, Service/Wartung und End-of-Life Situation ausdehnen. (vgl. Jensen et al., 1997; Herrmann 2009)

Ferner lässt sich festhalten, dass sich aus dem Lebenszyklusdenken Lebenszykluskonzepte für Produkte ableiten lassen. In der Literatur existiert eine Vielzahl von Definitionen und Phasenmodellen zu diesen Produktlebenszykluskonzepten. Die Grundlage dafür bildet die Vorstellung, dass Produkte, in Analogie zu biologischen oder natürlichen Systemen, bestimmte Lebensphasen des Werdens, des Bestehens und des Vergehens über die Zeit durchlaufen. (vgl. Herrmann 2010, S. 63ff.)

Diesen Ansatz greifen auch Jun et al. auf und bilden daraus das Lebenszyklusmodell über die Phasen Begin of Life (BOL), Mid of Life (MOL) und End of Life (EOL) ab (siehe Abbildung 18). Die unterschiedlichen Sequenzen innerhalb von BOL, MOL und EOL orientieren sich am sequentiellen Charakter, den ein Produkt von der Marktuntersuchung (Wunsch- und Anforderungsdefinition) bis hin zur Entsorgung durchläuft. (Jun et al. 2009)

Geht man von einer Kreislaufwirtschaft aus, wird somit das verantwortungsvolle Handeln von Unternehmen über den gesamten Produktlebenszyklus verstanden. Hier spielt die Produktentwicklung eine entscheidende Rolle, weil an deren Ende eine vollständige Definition des Produktes mit seinen Merkmalen und Eigenschaften (Birkhofer und Waeldele 2008) vorliegt und damit die weiteren Lebensphasen weitgehend festgelegt sind (in Anlehnung an Oberender 2006). So hat beispielsweise die Konstruktion eines Produktes einen bedeutenden Einfluss auf das Fertigungsverfahren während die technische Auslegung eines Produktes maßgeblich die Nutzungsdauer und entsprechende Wartungszyklen bestimmt. Auch Devanathan hält fest, dass die Aktivitäten im Entwicklungsprozess maßgebend zum Erreichen von Nachhaltigkeitszielen für die gesamte Wertschöpfungskette sind (Devanathan 2010). Endris et al. fügen dem hinzu, dass ca. 80-90% der Nachhaltigkeitserfüllung (engl. sustainable perfor-

mance) eines Produktlebenszyklus auf den Entscheidungen in der Produktentwicklungsphase beruht (Endris et al. 2011).

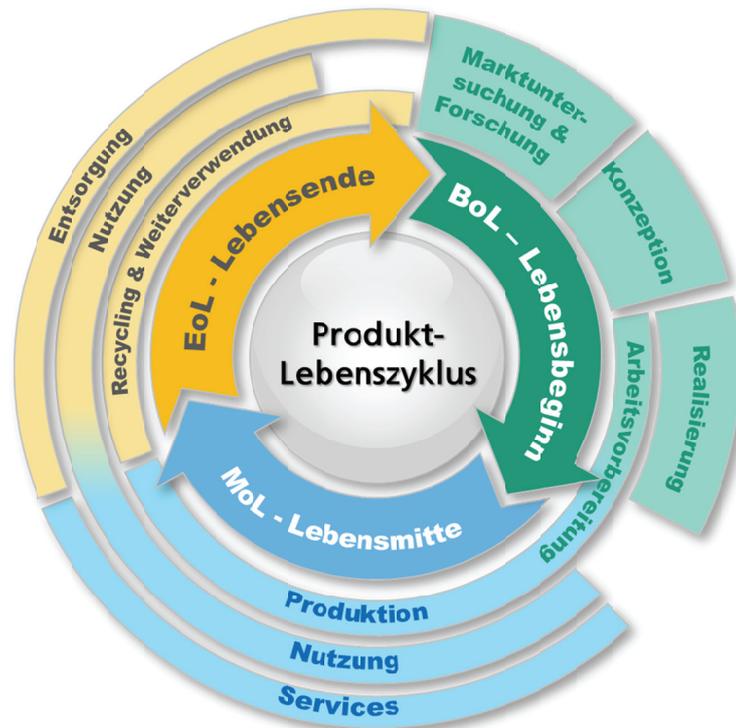


Abbildung 18: Produktlebenszyklus (in Anlehnung an Jun et al. 2009)

Wird das Lebenszyklusdenken im Unternehmen unter den Aspekten Wertschöpfungskette und Kreislaufwirtschaft betrachtet, handelt es sich dabei um einen ganzheitlichen Systemansatz, der nachhaltige Aspekte und Chancen entlang des gesamten Produktlebenszyklus adressiert. Das Denken in Lebenszyklen impliziert, dass jeder Stakeholder in jeder Phase des Produktlebenszyklus, von der Wiege bis zur Bahre⁸, eine gewisse Verantwortung trägt und auch eine bestimmte Rolle spielt (in Anlehnung an UNEP 2007, S.12). Von der Gewinnung eines Rohstoffes über Herstellung, Gebrauch oder Verbrauch, Wiederverwendung, Recycling oder Entsorgung muss sich jeder Stakeholder über die Auswirkungen seines Handelns und bewusst sein. Dabei müssen auch die Auswirkungen auf andere Lebensphasen und Akteure berücksichtigt werden. Mit dieser Denkweise sollen die potentiellen negativen Umweltauswirkungen und sozialen Einflüsse von Produkten und Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus verringert werden.

⁸ McDonough und Braungart beschreiben in ihrem Buch "The Cradle-to-Cradle – Re-making the way we make things" eine neue Denkweise zur Entwicklung von Produkten. Darin werden Entwicklungsprinzipien wie beispielsweise „Use 100% of renewable energy“, „Use healthy materials“ und „Separate biological and technical nutrients“ angeführt. (McDonough und Braungart 2009)

Die Forschungsarbeiten im Bereich des Lebenszyklusdenkens und der Produktentstehungsprozesse lassen sich hauptsächlich den Ebenen

- I. Prozess und Organisation und
- II. Entwicklungsaktivitäten und -methoden

zuordnen. Es wird im Folgenden der relevante Stand der Technik zu den folgenden Forschungsfragen erhoben:

1. Wie müssen Nachhaltigkeitsforderungen im Unternehmen kommuniziert werden und wie werden diese an Verantwortliche in der Produktentwicklung herangetragen?
2. Welche Aktivitäten werden durchgeführt und welche Methoden benötigen Entwicklungsingenieure, um nachhaltige Entscheidungen treffen zu können?

3.1.2 Relevante Forschungsarbeiten

Die Anzahl der veröffentlichten und eingesetzten Lösungen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte ist insbesondere in den letzten zwei Dekaden stark angestiegen. Damit einher ging eine fortwährende Spezialisierung der Lösungen, um einzelne Nachhaltigkeitsziele, beispielsweise gesetzliche Anforderungen an eingesetzte Werkstoffe, sicher erreichen zu können. Die Lösungen werden auf unterschiedlichem Detaillierungsgrad angegeben. Der Grad reicht dabei von generischen Rahmenwerken und daraus abgeleiteten Empfehlungen bis hin zu spezifischen Methoden, die über Studien abgesichert wurden. (Calderón et al. 2009)

Im Nachfolgenden werden relevante Forschungsarbeiten vorgestellt, die einen hohen Verbreitungsgrad in der wissenschaftlichen Literatur besitzen und auf Anwendbarkeit getestet wurden. Diese Arbeiten lassen sich im Wesentlichen sechs Themenfeldern zuordnen:

- Sustainable Product Development
- Eco-Design und Eco-Innovation
- Design for Environment
- Design for Sustainability
- Life Cycle Assessment
- Environmental Management Systems

Tabelle 2 zeigt eine qualitative Bewertung der Forschungsarbeiten über die Integration in die verschiedenen Unternehmensebenen (normativ, strategisch, operativ). Für die Bewertung wurden die zwei Kriterien Verbreitungs- („nicht vorhanden“ ... „umfassend vorhanden“) und Detaillierungsgrad („schwach ausgeprägt“, „stark ausgeprägt“) berücksichtigt. Unter Verbreitungsgrad wird dabei verstanden, wie häufig die Lösungen in der Literatur vorgestellt und

referenziert wurden. Unter Detaillierungsgrad wird dagegen verstanden, wie genau die Lösungen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit beschrieben sind.

	Normativ	Strategisch	Operativ
Sustainable Product Development	●	◐	◑
Eco-Design und Eco-Innovation	◐	◐	◑
Design for Environment	◑	◐	◑
Design for Sustainability	◐	◐	◐
Life Cycle Assessment	◐	◑	●
Environmental Management Systems	●	●	◑

○ kaum oder nicht vorhanden
 ◐ kaum vorhanden und schwach ausgeprägt
 ◑ teilweise vorhanden und schwach ausgeprägt
 ● teilweise vorhanden und stark ausgeprägt
 ● umfassend vorhanden und stark ausgeprägt

Tabelle 2: Ausprägungsgrad der Themenfelder in den verschiedenen Unternehmensebenen

Nach einer qualitativen Einschätzung wird aufgeführt, wie stark die Themenfelder für lebenszyklusorientierte Produktentwicklungen in den einzelnen Unternehmensebenen ausgeprägt sind. Hier wurde bei der qualitativen Einschätzung sowohl der Verbreitungsgrad in der Fachliteratur als auch der Einsatz in der industriellen Anwendung berücksichtigt.

3.1.2.1 Sustainable Product Development

Sustainable Product Development (SPD) beschäftigt sich mit grundsätzlichen Bedürfnissen, essentiellen Produktfunktionen, den Systemen in denen Produkte funktionieren, der Natur, Verfügbarkeit und Auswahl von Ressourcen und der Verteilung dieser über Länder und Generationen. Anders als Ecodesign und DfE geht das Konzept Sustainable Product Development über eine umwelttechnische Optimierung von Produkten und Dienstleistungen hinaus. Zent-

rale Aspekte von SPD sind gegenwärtige und zukünftige Verfügbarkeit von Ressourcen, sowie elementare Bedürfnisse und die Anzahl von Menschen, die von diesen Ressourcen profitieren könnte (van Weenen 1995, S.98).

Neue integrierte Ansätze, die SPD verinnerlichen, sind selten und schwierig zu finden. Auf den ersten Blick scheint es so, als ob Beispiele für solche Integrationen neu und einzigartig seien. Oft existieren sie jedoch schon in großer Zahl als traditionelle Arbeitspraktiken. In einem von Nachhaltigkeit geprägten Rahmen, stellen integrierte Ansätze von SPD kreativitätsstimulierende Arbeitsanweisungen für die Industrie dar (van Weenen 1997, S.6).

In den letzten Jahren wurde wenig zum Thema SPD publiziert. Eine Ausnahme bildet die „UNEP Working Group on Sustainable Product Development“ (Jansen 2006, S.3). Im Gegensatz zu den Konzepten DfE und DfS ist SPD stärker auf der normativen Ebene ausgeprägt. Es werden in der Literatur meist grundlegende Leitlinien und Prinzipien erklärt sowie ihre Notwendigkeit für eine nachhaltige Entwicklung betont, konkrete Arbeitsanweisungen für Unternehmen fehlen jedoch auf der normativen Ebene. Auf der strategischen Ebene wurden ebenfalls einige Ansätze identifiziert. Es handelt sich hauptsächlich um Methoden, die Nachhaltigkeit für den Produktentwickler sichtbar machen sollen und strategische Entscheidungen zu unterstützen. Die konkreten Arbeitsanweisungen und Werkzeuge, die im Rahmen von SPD genannt werden decken sich mit DfE/Ökodesign und DfS Methoden, sind ökologisch geprägt und lassen eine Integration der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit vermissen.

Sustainable Product Development auf normativer Ebene

Das Konzept von SPD ist komplex und multidisziplinär. Es beinhaltet eine Vielzahl verschiedener, miteinander verknüpfter Probleme, die beachtet werden müssen. Um SPD in Unternehmen zu leben, müssen technische Komponenten sowie psychologische, politische und ökonomische Elemente in einer holistischen Perspektive zusammengefasst werden. SPD bedeutet nicht nur, ein Produkt aus umwelttechnischer Sicht zu optimieren, sondern das nachhaltigste Produkt zu entwickeln, das ein Kundenbedürfnis befriedigt. (Jansen 2006, S.9)

Der Übergang zu einem nachhaltigen Konsum erfordert tiefe kulturelle und technologische Veränderungen. Es ist schwierig, soziale, psychologische, kulturelle und institutionelle Traditionen die die Nachfrage nach Produkten formen, zu verändern. Veränderung setzt den Willen zur Wandel voraus und jede Gesellschaft beinhaltet Werte, die sie entweder fördern oder hindern können. Folglich müssen jene Entscheidungsträger in Industrie, Politik und der Öffentlichkeit, die diese Veränderung befürworten und unterstützen, selbst diese Werte verinnerlichen. Dies erfordert einen Abgang von der traditionellen Philosophie, sich selbst in den

Mittelpunkt zu stellen, die zu den tragenden Pfeilern der Gesellschaft industrialisierter Länder geworden ist. Das aktuelle Wirtschaftssystem ist auf die Stimulierung exzessiven Konsums nicht-essentieller Güter ausgelegt. Der Wechsel sollte zu einem nachhaltigeren Konsum, saubereren Produktionsmethoden mit saubereren Methoden unter Verwendung von Ökodesign führen. (Jansen 2006, S.10)

Sustainable Product Development auf strategischer Ebene

Byggeth et al. präsentieren eine Methode für Sustainable Product Development (MSPD) mit dem Ziel, soziale und ökologische Nachhaltigkeitsaspekte mit einer strategischen Unternehmensperspektive in den Produktentwicklungsprozess zu integrieren. Die Methode verwendet Backcasting (Holmberg 2000, S. 291), ausgehend von den grundlegenden Prinzipien der Nachhaltigkeit. Dieses Vorgehen beinhaltet ein modulares System von leitenden Fragen, die von diesen Prinzipien, sowie dem Produktlebenszyklus abgeleitet wurden und stellt somit einen strategischen Ansatz zur Produktentwicklung dar. Tests in schwedischen Unternehmen zeigten, dass MSPD eine „Vogelperspektive“ auf den Produktentstehungsprozess einnimmt und die Produktentwicklung dabei unterstützt, die Gesellschaft zu einem nachhaltigen Wandel über die nachhaltige Nutzung von Produkten zu bewegen. Der modulare Aufbau von MSPD gewährleistet hierbei Flexibilität und Benutzerfreundlichkeit (Byggeth et al. 2007, S.1).

Howarth et al. entwickelten ein Modell, das Produktentwickler ein Werkzeug zur Verfügung stellt, nachhaltigkeits- und produktbezogene Probleme in einer überschaubaren und handhabbaren Form darzustellen. So können die Wichtigkeit von Stakeholderinteressen und -ansichten sowie spezielle Probleme genauer erkannt werden. Ein nachhaltigeres Endprodukt sollte so gewährleistet werden. Das Modell stellt generische Themen für Produkt, Unternehmen und Standort, sowie einfach zugängliche Informationen für diese Themen bereit. Die Analyse erfolgt via Excel-Tabellen, in denen der Einfluss jeder der drei Themen evaluiert, zu den drei Säulen einer nachhaltigen Entwicklung – Ökonomie, Umwelt und Gesellschaft – zugeordnet, bewertet und abschließend als Nutzen oder Gefahr eingestuft wird. Nutzen und Gefahren werden mittels Tabellen oder Graphen dargestellt und ausgewertet. (Howarth und Hadfield 2006, S.1030ff.)

Sustainable Product Development auf operativer Ebene

Jansen vertritt das Konzept Ökodesign und die LCA Methode als geeignete Werkzeuge zur Implementierung von SPD auf der operativen Ebene. Ökodesign biete die Möglichkeit, vorbeugend Umwelteinflüsse von Produkten in frühe Designentscheidungen mit einzubeziehen. Durch Life Cycle Assessment (LCA) wird der kumulierte Umwelteinfluss des Produktes, vom

Abbau der Ressourcen bis hin zur endgültigen Entsorgung, ermittelt. Die Methode reflektiert daher die komplexen involvierten Beziehungen und Wechselwirkungen. LCA unterstützt Entscheidungsprozesse durch Informationsbereitstellung für Regierungen, Hersteller, Produktentwickler und Konsumenten und generiert geeignete Lösungen, oft durch Entwicklungsvariationen. Zum Beispiel könnten Umweltbelastungen, die in der Entsorgungsphase entstehen, durch eine LCA vorausgesehen werden und durch Ökodesign korrigiert werden. Das Ökodesign-Konzept und die LCA-Methode wirken ergänzend und vorbeugend in ihrem Beitrag zum Umweltschutz (Jansen 2006, S.9). Simon und Sweatman kritisieren hingegen DfE-Methoden, da diese Produkte in Bezug auf Nachhaltigkeit nur schrittweise verbessern und nicht das „nachhaltige Produkt“, das sich durch eine sehr hohe Öko-effizienz auszeichnet, anstreben (Simon und Sweatman 1997).

Offensichtlich ist SPD auf der operativen Ebene wenig ausgeprägt. Während Autoren, die die normativen Leitsätze formulieren, DfE/Ökodesign für seine Umweltbezogenheit und fehlenden Bezug auf die soziale Dimension kritisieren, existieren keine konkreten Methoden und Werkzeuge, um den ganzheitlichen Ansatz von SPD auf der normativen Ebene umzusetzen.

3.1.2.2 Eco-Design und Eco-Innovation

Unter Eco-Design und Eco-Innovation werden Methoden in der Produktentwicklung verstanden, die hauptsächlich umweltfreundliche Produkte hervorbringen sollen. Dahinter steht die Annahme, dass Entscheidungen immer zugunsten des geringsten Umwelteinflusses in jeder Phase des Lebenszyklus getroffen werden (Aoe 2007). Dabei wird der traditionelle Entwicklungsfokus über die Phasen Produktion (z.B. Kernaufgabe des Entwicklers liegt im Sicherstellen der Herstellbarkeit) und Nutzung (z.B. Kernaufgabe des Entwicklers liegt im Sicherstellen der gewünschten Funktionalität des Produktes) zu den vorgelagerten Phasen der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung sowie zur nachgelagerten Phase des Lebensendes (End of Life) erweitert (Knight and Jenkins 2009), siehe Abbildung 19.

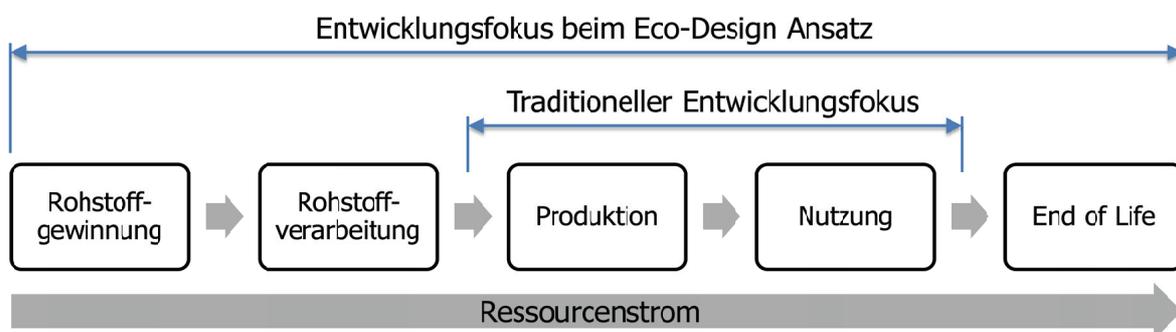


Abbildung 19: Verschiebung des Entwicklungsfokus beim Eco-Design (in Anlehnung an Knight and Jenkins 2009)

Somit wird der Entwicklungsfokus auch auf den schonenden Umgang mit Ressourcen vor der Produktion des eigentlichen Produktes sowie auf die Strategie am Ende des Produktlebensweges nach der Nutzungsphase gelenkt. Der Verantwortungsbereich des Entwicklers wird dadurch erweitert. Folglich führt der Eco-Design Ansatz dazu, dass er über seine klassischen Entwicklungsziele hinaus denken muss und umweltgerecht – hauptsächlich ressourcenschonend – entwickeln und konstruieren muss.

Die folgende Tabelle stellt ausgewählte Definitionen von Eco-Design und Eco-Innovation zusammen (Tabelle 3).

Autor(en)	Definition
Alonso 2006	Ecodesign is an approach that integrates environmental criteria in the design of products and services, so as to get the reduction of environmental impacts they produce, taking into account all stages of their lifecycle.
Wimmer et al. 2004	Ecodesign is how to integrate environmental considerations into product design and development.
Borchardt et al. 2011	Ecodesign is a set of project practices oriented to the creation of eco-efficient products and processes.
Bhamra 2004	Ecodesign is understood to be the systematic integration of environmental considerations into the design process across the product lifecycle, from cradle to grave.
Abele et al. 2008, S.4	Ganzheitliche ökologische, ökonomische und technische Optimierung von Produkten unter der Berücksichtigung des gesamten Lebenswegs.
Pigozzo et al. 2010a	Eco design is a proactive approach of environmental management that aims to reduce the total environmental impact of products.

Tabelle 3: Übersicht für ausgewählte Definitionen der Begriffe Eco-Design und Eco-Innovation

Die Definitionen belegen, dass in der Fachliteratur ein einheitliches Verständnis des Eco-Design Konzeptes herrscht: Ein Produkt soll durch die Berücksichtigung des gesamten Lebenswegs schon möglichst in den frühen Phasen der Produktentwicklung umweltfreundlich gestaltet werden. Die Möglichkeiten, wie dies umgesetzt werden kann, sind jedoch vielfältig. Aus diesem Grund hat das EU Themennetzwerk ECOLIFE fünf wesentliche Eco-Design Prinzipien definiert (ECOLIFE 2013), die sich wiederum den Ebenen der Nachhaltigkeit im Unternehmen zuordnen lassen:

1. Life Cycle Thinking (Normative Ebene)
2. EcoDesign Strategies (Strategische Ebene)
3. EcoDesign Process and Continuous Improvement (Strategische Ebene)
4. Tools and Methods (Operative Ebene)
5. Internal and External Dialogue and Partnership (Operative Ebene)

Abbildung 20 verdeutlicht den Zusammenhang dieser fünf Prinzipien. Es wird deutlich, dass das Eco-Design Konzept nur umsetzbar wird, wenn alle Prinzipien innerhalb eines Unternehmens befolgt bzw. umgesetzt werden.

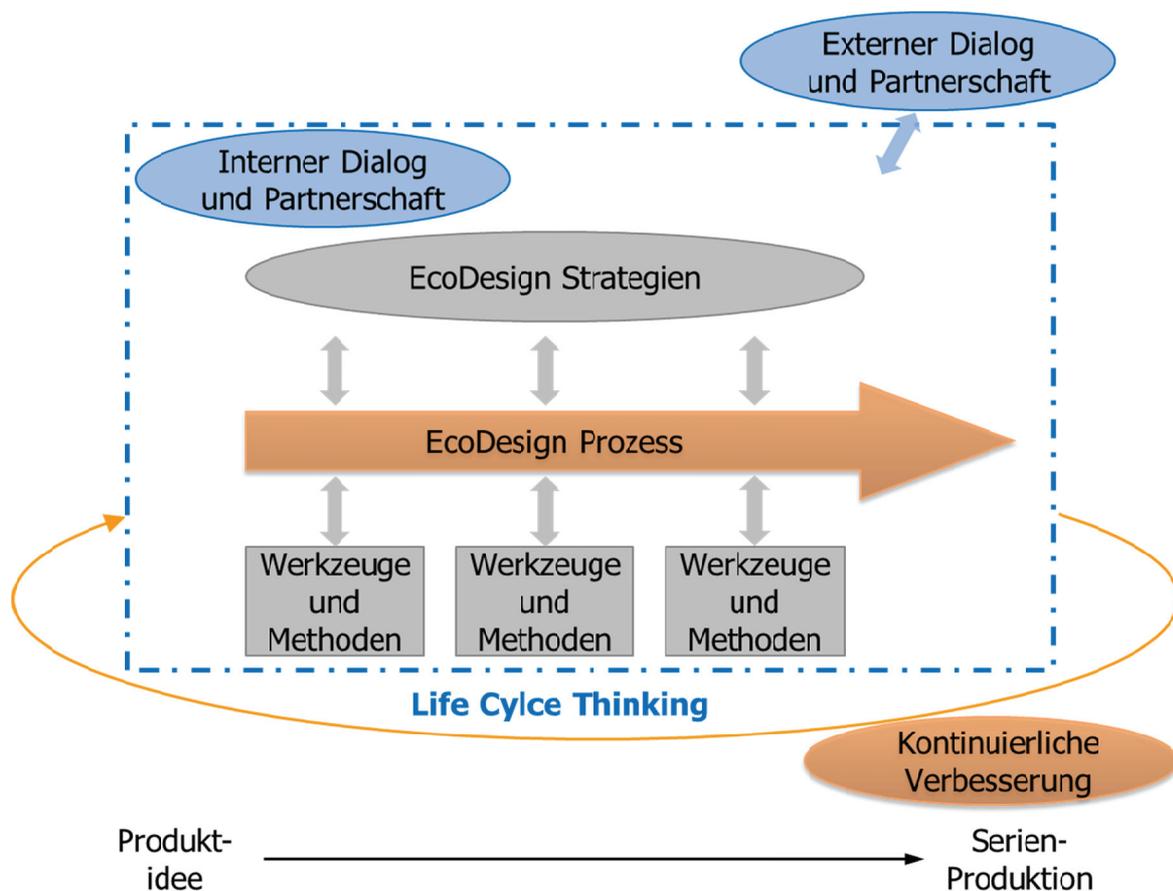


Abbildung 20: Zusammenhänge der fünf Eco-Design Prinzipien nach dem EU ECOLIFE Themen-netzwerk (nach ECOLIFE 2013)

Eco-Design auf normativer Ebene

Das Lebenszyklusdenken (Life Cycle Thinking) im Bereich des Eco-Designs beschränkt sich auf die Betrachtung der Ressourcennutzung über alle Lebensphasen hinweg. Es gilt, eine möglichst geringe Nutzung von Ressourcen bei gleichzeitig ausgewogener Balance der Ressourcennutzung über die einzelnen Lebensphasen hinweg zu finden. Damit soll vermieden werden, dass beispielsweise negative Umwelteinflüsse von der Herstellung eines Produktes in die Nutzungsphase verschoben werden.

Eco-Design auf strategischer Ebene

Laut ECO-Life lassen sich, insbesondere vor dem Hintergrund verschiedener Unternehmensgrößen und unterschiedlichem Organisationsaufbau, keine einheitlichen Eco-Design Prozesse festlegen. In größeren Unternehmen lassen sich diese Prozesse meistens über konkrete Meilensteinanforderungen steuern, während in kleineren Unternehmen eher informelle und intuitive – und damit personengebundene – Prozesse für die umweltfreundliche Gestaltung eines Produktes verantwortlich sind. Nichtsdestotrotz sollen stets mehrere Domänen in die Produktauslegung und -gestaltung einbezogen werden. Dazu gehören u.a. Zulieferer, Marketing und Kunden. Diese sollen beim Entwickler das Verständnis für lebenszyklusorientiertes Denken fördern und fordern. So können beispielsweise technische Entscheidungen über Material, Herstellungsverfahren und Art des Recycling von den verschiedenen Stakeholdern aus allen Lebenszyklusphasen beeinflusst werden. (ECOLIFE 2013)

Eco-Design auf operativer Ebene

Eco-Design auf operativer Ebene greift hauptsächlich Methoden und Werkzeuge aus dem Bereich Design for Environment auf. Diese werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

3.1.2.3 Design for Environment

Von einer Mehrzahl der Autoren werden die Begriffe Ökodesign (Ecodesign) und Design für Environment (DfE) in der Literatur deckungsgleich verwendet (Birch et al. 2012). Zudem merkt Lagerstedt an, dass die Begriffe DfE, Ecodesign, Life Cycle Design, Sustainable Design, Green Design, Environmental Conscious Design, Life Cycle Design, Life Cycle Engineering und Clean Design konzeptuell die gleichen Ziele haben (Lagerstedt 2003). Das Feld „Design for Environment“ deckt jegliche Designaktivität ab, die zum Ziel hat, die Umweltverträglichkeit eines Produktes zu verbessern. DfE-Methoden wurden für eine Vielzahl von Produkten entwickelt und viele Industriesektoren haben ihre eigenen Vorgehensweisen entwickelt. Seit den 1990er Jahren haben mehrere öffentliche Projekte zum Ziel, generell anwendbarere Methoden zu entwickeln. Die Arbeit der „International Standardisation Organisation“ resultierte beispielsweise in einer Richtlinie für Ökodesign (ISO/TR 14062⁹). Die Vielfalt der Methoden reicht von generellen bis zu spezifischen Werkzeugen, die sich auf spezielle Teile des Lebenszyklus oder bestimmte Arten von Produkten beschränken. Manche Methoden sollen Entscheidungen in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses unterstützen, während andere in den späteren Design Phasen zum Einsatz kommen. (Hauschild et al. 2004)

⁹ ISO/TR 14062:2002: Environmental management - Integrating environmental aspects into product design and development. (ISO/TR 14062)

Design for Environment auf der normative Ebene

Produktentwicklung ist eine der wichtigsten Aktivitäten eines Unternehmens auf dem Weg zu einer globalen Nachhaltigen Entwicklung (Nidumolu et al. 2009). DfE kann nur implementiert werden, wenn das Leitbild Nachhaltigkeit auch auf der normativen Ebene in die Unternehmensphilosophie aufgenommen ist. DfE kann hier als Maßnahme für die Corporate Social Responsibility Politik des Unternehmens verwendet werden, hat sonst aber auf der normativen Ebene keine weiteren Ausprägungen.

Design for Environment auf der strategischen Ebene

Lagerstedt fasst DfE-Regeln für die Produktentwicklung wie folgt zusammen. Es sollten zunächst keine toxischen Substanzen verwendet werden und nach Möglichkeit geschlossene Lebenszyklen (closed loops) verwendet werden. Energie- und Materialverbrauch in Produktion, Logistik und in der Nutzungsphase des Produktes sollten auf ein Mindestmaß reduziert werden, während Wartung und Instandhaltung so leicht wie möglich gestaltet werden sollten. Darüber hinaus soll ein langes Produktleben angestrebt werden, vor allem für Produkte deren negativen Umwelteinflüsse hauptsächlich außerhalb der Nutzungsphase auftreten. High-Tech Materialien sollten verwendet werden, um das Gewicht des Produktes zu verringern, sofern dies nicht die anderen Produkteigenschaften negativ beeinflusst. Ferner sollen auch geeignete Materialien verwendet werden, um das Produkt gegen Schmutz und Korrosion zu schützen. Im Voraus sollte nach Möglichkeit das Upgraden (Aufrüsten), die Reparatur und das Recyceln des Produktes erleichtert werden. Hierzu sollte ein einfacher Zugang gewährleistet, Module verwendet und gute Anleitungen erstellt werden und das Produkt aus möglichst wenigen einfachen Materialien zusammengesetzt sein. (Lagerstedt 2003)

Hauschildt et al. befürworten zur strategischen Fokussierung der DfE-Methodik einen systematischen analytischen Ansatz, der mit einer Identifikation der vom Produkt bereitgestellten Funktionen beginnt. Eine Analyse über die optimale Gewährleistung dieser Funktionen und ein Geschäftsmodell wird aufgestellt. Diese Überlegungen sollte auch die strategische Perspektive beinhalten.

Über das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung sollen Unternehmen langfristig eine Änderung der Produktstrategie herbeiführen. Es stellt sich die Frage, ob das Produkt seinen Platz in einer nachhaltigen Wirtschaft findet, sein Nutzen durch eine andere Lösung (z.B. Product-Service-Systems) ersetzt werden kann oder das Unternehmen in ein anderes Produkt investieren sollte. (Hauschild et al. 2004, S.3f.)

Design for Environment auf der operativen Ebene

Trotz vieler guter Beispiele für gut entwickelte DfE-Methoden und Werkzeuge, verhindern verschiedene Faktoren, dass diese nicht ausreichend in Unternehmen Anwendung finden. Boks und Pascual vermuten, dass diese hauptsächlich auf der nicht-technischen Seite der Methodik liegen, d.h. sie betreffen nicht die Durchführung der Methode selbst (Boks und Pascual 2004). Auch in weiterer Literatur findet sich die Vermutung wieder, dass die Hindernisse und Erfolgsfaktoren eng mit den Fragen „Wer entscheidet welche Methode zu benutzen?“ und „Wie wird diese Entscheidung getroffen?“ verknüpft sind. Dieses Bedürfnis wurde von Vargas Hernandez et al. erkannt. Sie entwickelten ein entsprechendes Expertensystem, das Ingenieure bei der Entscheidungsfindung zur Methodenunterstützung helfen soll. (Vargas Hernandez et al. 2012)

Die ISO/TR 14062 schlägt 30 konkrete Werkzeuge und Methoden vor, die in der Form ihrer Datenpräsentation und Anwendung im Produktentstehungsprozess variieren. Sie können in drei Kategorien eingeteilt werden: Werkzeuge und Methoden, die auf Checklisten basieren, solche die auf LCAs basieren und solche, die auf Quality Function Deployment (QFD) basieren (Ramani et al. 2010, S.3).

Werkzeuge, die auf Checklisten basieren, sind qualitativer Natur, einfach zu handhaben und in der Industrie am weitesten verbreitet (Luttrupp und Lagerstedt 2006, S. 1396). Sie sind spezifisch für die frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses entwickelt und verglichen mit LCA-basierten Methoden eher subjektiv in der Ergebnisinterpretation. Außerdem stellen sie in der Regel keine konkreten Problemlösungen bereit (Ramani et al. 2010, S.3).

Eine Lebenszyklusperspektive sollte möglichst schnell eingenommen werden, um zu identifizieren, in welcher Lebensphase des Produktes der größte Einfluss auf die Umwelt genommen wird. Die Ökobilanz (LCA) bietet zu diesem Zweck eine geeignete Methode. In den frühesten Phasen des PEP (Idee- und Konzeptphase), in denen das Produkt noch nicht ausgearbeitet ist und wenige Produktinformationen vorliegen, kann eine quantitative LCA jedoch noch nicht eindeutig durchgeführt werden. Ein qualitatives Lebenszyklusdenken oder eine qualitative LCA verschiedener Produktkonzepte und -szenarien ist hier oft deutlich sinnvoller. Später im Produktentstehungsprozess können entsprechende Anpassungen der vorläufigen Methoden vorgenommen werden. (Hauschild et al. 2004, S. 3)

Die LCA hat sich zum objektiven Werkzeug für die Evaluierung der Umwelteinflüsse eines Produktes oder Prozesses entwickelt. Zur Durchführung einer quantitativen, vollständigen LCA sind jedoch Informationen notwendig, die erst vorliegen, wenn das Produkt und sein

weiterer Lebensweg hinreichend spezifiziert sind. Zusätzlich ist die Durchführung einer LCA kosten- und zeitintensiv und kann daher nur von größeren Unternehmen umgesetzt werden. Es wurden Versuche unternommen, vereinfachte LCA zu entwickeln, um diese Problematik zu adressieren. Kritikpunkt ist dabei im Wesentlichen die fehlende Einbeziehung von wichtigen Informationen aus anderen Lebenszyklusphasen (Ramani et al. 2010, S.3; Todd und Curran 1999, S.2). Ein weiteres Problem der LCA aus DfE-Sicht ist die fehlende Design-Orientierung. (Ramani et al. 2010)

Das Ziel einer traditionellen QFD ist es, unter gleichzeitiger Verbesserung der Qualität, Kundenanforderungen in Produkteigenschaften umzuwandeln. Durch die Einführung von Umwelteinflüssen als zusätzliche Kundenanforderungen wurde eine Reihe von DfE-Werkzeugen entwickelt (z.B. QFD for Environment, Green Quality Function Deployment, House of Ecology) (Masui et al. 2003, S.90). Die Methoden reichen vom Sammeln der Kunden- und Umweltanforderungen über das Finden von Korrelationen zwischen ihnen und Qualitätscharakteristiken bis hin zu einer funktionellen Analyse. Die QFD-basierten Methoden finden im Gegensatz zu LCA-basierten Methoden in der Anforderungsformulierung ihre Anwendung (Ramani et al. 2010, S.3).

Ferner existieren Methoden, wie beispielsweise das Design-for-Environment Evaluation Tool von Pigozzo et al. (Pigozzo et al. 2010a), die eine direkte Verbindung zwischen Ressourceneinsatz und funktionalen Produktmerkmalen verbinden. Diese werden in Kapitel 3.2.2 näher betrachtet. Dabei bleibt allerdings offen, wie detailliert Design for Environment Zusammenhänge zwischen Konstruktion und Produktleben aufzeigt. So bleiben beispielsweise klassische Lastkollektive zur Produktauslegung in der Konstruktionstechnik als Mittel zur Lebensdauerbestimmung im Bereich von Design for Environment unberücksichtigt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass auf der normativen Ebene wenig Literatur bezüglich DfE zu finden ist. Mit der strategischen Ebene wird sich hingegen zunehmend beschäftigt. Die Wichtigkeit von DfE-Regeln, sowie die strategische Planung der Produktentstehungsprozesse sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten. Auf der operativen Ebene ist DfE stark ausgeprägt. Hier finden sich viele verschiedene Werkzeuge und Methoden, die unterschiedlich weit entwickelt sind.

3.1.2.4 Design for Sustainability

Spangenberg et al. beschreiben Design for Sustainability (DfS) als eine Reaktion der Produktentwicklung auf die Herausforderung einer nachhaltigen Entwicklung. DfS ist als ein umfangreicherer Begriff als Ökodesign und Design for Environment (DfE) zu verstehen, da so-

wohl soziale als auch ökonomische, ökologische und institutionelle Aspekte gleichermaßen betrachtet werden. (Spangenberg et al. 2010, S. 1085f.)

Auch Ameta versteht unter Design for Sustainability ein übergeordneten Begriff, der verschiedene DfX-Konzepte (Design for X) beinhaltet und alle Dimensionen der Nachhaltigkeit über den gesamten Produktlebensweg berücksichtigt. In Abbildung 21 sind beispielhafte DfX-Konzepte und ihre Einordnung in Relation zum Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit dargestellt. (Ameta 2009)

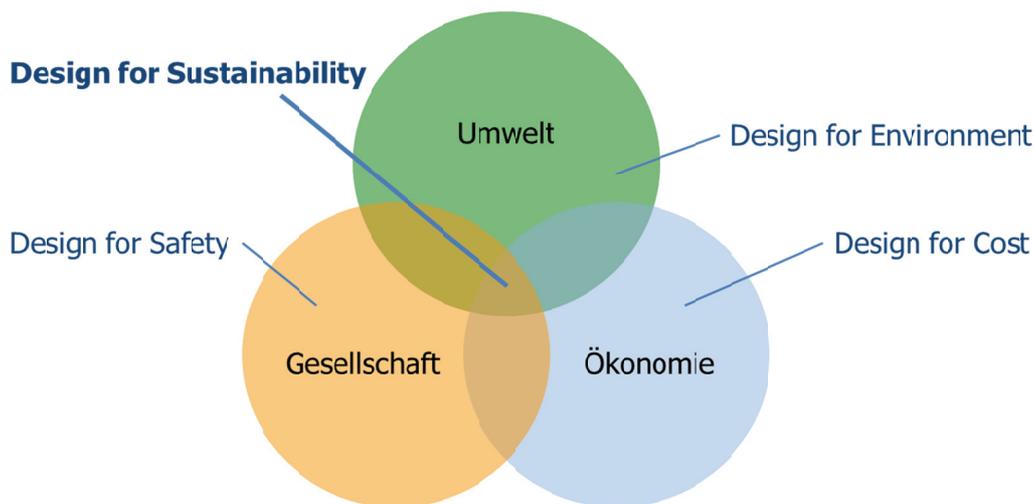


Abbildung 21: Einordnung von Design for Sustainability und untergeordneter DfX-Konzepte in Relation zum Drei-Säulen Modell der Nachhaltigkeit (nach Ameta 2009)

Während Ökodesign sich auf die ökonomische und ökologische Dimension beschränkt, hat DfS den Anspruch, das gesamte Leitbild der nachhaltigen Entwicklung zu adressieren und somit größere Systeme zu erfassen. Dadurch können fundamentalere Fragen nach Konsum und Produktion gestellt werden (Spangenberg et al. 2010, S. 1085f.). Das Prinzip DfS kann Menschen dabei helfen, in Frage zu stellen, was sie durch Ihre Kaufentscheidung erreichen wollen. Mit dem richtigen Training hat der Produktentwickler die Möglichkeit, auf die Einstellung des Konsumenten Einfluss zu nehmen und ihn zu einem nachhaltigeren Verhalten zu bewegen (Bhamra und Lofthouse 2007, S.35).

Ein zentrales Konzept von DfS ist laut Jawahir die Erkenntnis, Produkte über ihren Lebenszyklus hinaus zu entwickeln. Lösungen für das Lebensende eines Produktes, wie Demontage, Recycling, Rohstoffwiedergewinnung und -Aufbereitung sowie Wiederverwendung, müssen vom Produktentwickler gefunden werden (Jawahir et al. 2006, S.421f.).

Design for Sustainability (D4S) ist eine Methodik, die auf DfS Prinzipien aufbaut. Sie wurde von der TU Delft in Zusammenarbeit mit der United Nations Environment Programme (UNEP) entwickelt und beinhaltet eine Arbeitsanweisung zur Produktverbesserung. D4S beinhaltet

Methoden zur nachhaltigen Neuproduktentwicklung, zum Neugestalten von Produkten (D4S Redesign), zu radikaler nachhaltiger Produktinnovation und einen nachhaltigen Ansatz für Benchmarking (Crul und Diehl 2009, S. 31).

Der nachhaltige Produktentwicklungsprozess nach D4S folgt prinzipiell ähnlichen Strukturen wie der klassische Ökodesignprozess nach Abele et al. (Abele et al. 2008). Er lässt sich in die Phasen der Formulierung der Unternehmenspolitik, der Ideengenerierung und der Realisierung einteilen (Crul und Diehl 2009, S. 31).

Design for Sustainability auf normativer Ebene

Da DfS auf dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung basiert, müssen Unternehmen dieses in ihre Leitbilder, Normen und Handlungsräume übernehmen. Die normative Managementebene wird in der D4S Methodik in Phase I: Formulierung der Unternehmenspolitik angesprochen. Hier formuliert das Unternehmen seine Vision, seine moralische und ethische Position, sein angestrebtes Bild in der Öffentlichkeit und beschreibt seinen Zielmarkt. Diese Vorgehensweise beschreibt jedoch nur generelle Managementaktivitäten. Eine Integration von nachhaltigen Elementen ist nicht konkret vorgesehen (Crul und Diehl 2009, S. 32).

Crul und Diehl von der Delft University haben in Kooperation mit der UNEP Production and Consumption Unit of the Division of Technology, Industry and Economics einen praxisorientierten Leitfaden zur Entwicklung nachhaltiger Produkte für sich entwickelnde Länder aufgestellt. Der Leitfaden beschränkt sich im Wesentlichen auf die Weiterentwicklung (Re-Design) von existierenden Produkten. Für die umweltfreundliche und sozial verträglich Anpassung/Änderung eines Produktes wird ein D4S Projekt aufgesetzt. Um ein D4S Projekt erfolgreich in einem Unternehmen abzuwickeln, beschreibt der Leitfaden drei praxisorientierte Schritt-für-Schritt Anleitungen. (Crul und Diehl 2009)

Im ersten Schritt wird analysiert, auf welchem Markt und in welcher Branche ein D4S Projekt umgesetzt werden soll. Dazu wird eine Bewertung des Zielmarktes ausgehend von der ökonomischen Wirtschaftskraft auf Landesebene vorgenommen und die vertretenen Branchen priorisiert (Abbildung 22).

Zu der Bewertung bzw. Einschätzung werden die folgenden drei Kriterien herangezogen, analysiert und ausgewertet:

- Bruttoinlandsprodukt (BIP)
- Human Development Index (HDI)
- Competitive Growth Index (CGI)

- Import und Export von Gütern und Ressourcen
- Ökonomie in den Sektoren Landwirtschaft, Industrie und Dienstleistungen
- Industrieller Fortschritt im Land
- Verhältnis und Struktur von KMU, großen Unternehmen und Konzernen
- Stellenwert des informellen Sektors (kulturelle und soziale Beziehungen im Land)
- Stellenwert von Nachhaltigkeitsaspekten auf nationaler und unternehmerischer Ebene

Die weitere Vorgehensweise nach Crul und Diehl findet auf der strategischen Ebene statt.

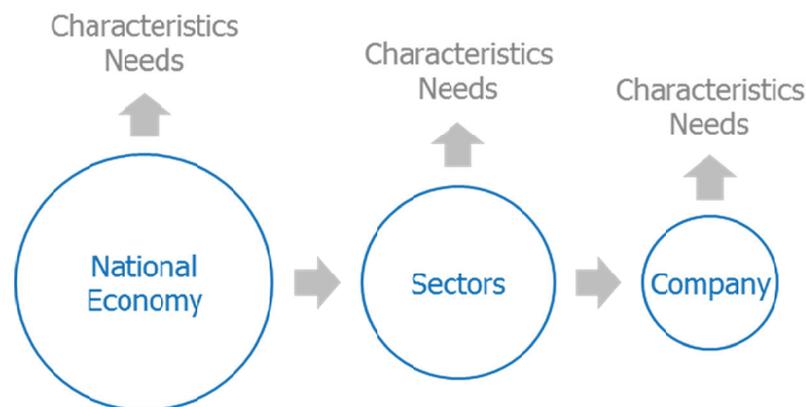


Abbildung 22: Characteristics and needs auf verschiedenen Ebenen
(nach Crul und Diehl 2009, S. 45.)

Design for Sustainability auf strategischer Ebene

Elemente der strategischen Ebene finden sich ebenfalls in der ersten Phase zur Formulierung der Unternehmenspolitik der D4S-Methodik wieder. Nachdem die oben angesprochenen normativen Grundlagen erarbeitet wurden, sollen nach dem D4S Leitfaden konkrete, quantifizierte Ziele und Strategien zu deren Erreichung erarbeitet werden. Eine SWOT-Analyse dient der Orientierung. Hier werden die Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Gefahren einander gegenübergestellt. Der Produktlebenszyklus wird von der Perspektive des Marktes betrachtet, um ein geeignetes Produktportfolio strategisch auszuwählen und Innovationsprojekte zeitlich gezielt zu initiieren. Innovationslücken (Innovation Gaps) sollen identifiziert und Strategien für ihre Deckung entwickelt werden. Dabei werden Werkzeuge wie die Wachstumsmatrix und die Competitive Strategies Matrix nach Porter eingesetzt (Crul und Diehl 2009, S. 35ff.). Im D4S Needs Assessment wird die D4S Innovationsstrategie mittels eines Worksheets ausgearbeitet. Der D4S Needs Assessment Action Plan unterstützt das Finden eines konkreten D4S-Projektes mit Mind-Maps (Crul und Diehl 2009, S. 54f.). Auch hier sind die Methoden auf den allgemeinen Strategiefindungsprozess bezogen und das Leitbild Nachhaltigkeit wird nicht konkret adressiert (Abbildung 23).

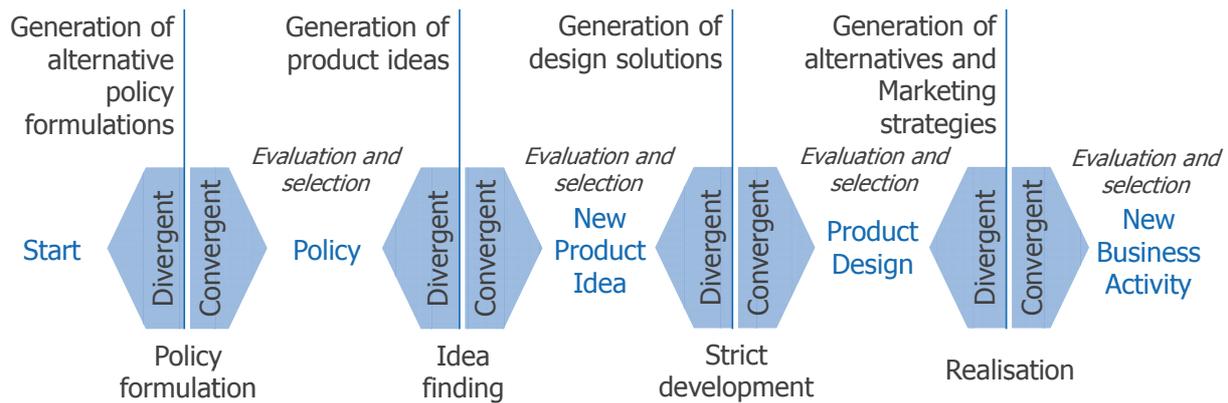


Abbildung 23: Ablaufplan für die Entwicklung eines nachhaltigen Produktes (nach Crul und Diehl 2009, S. 32.)

An dieser Stelle ist anzumerken, dass jede Phase zunächst aus divergierenden Aktivitäten besteht, denen konvergierende Aktivitäten folgen. Zu den divergierenden Aktivitäten zählt unter anderem die Anwendung von Methoden zur kreativen Ideenfindung, zur Problemdefinition und zur Informationssuche. Um den so gefundenen Lösungsraum wieder einzuschränken und eine Entscheidung herbeizuführen, werden konvergierende Methoden wie beispielsweise das Priorisieren von Merkmalen/Eigenschaften, Lösungsvergleiche, Ideenbewertungen und Konzeptbeurteilungen angewandt.

Abschließend wird im dritten Schritt ein Benchmarking vorgenommen, um abzugleichen, ob das weiterentwickelte bzw. angepasste Produkt, auf dem Zielmarkt sowohl wirtschaftlich erfolgreich als auch sozial verträglich und umweltfreundlich sein kann. Beim Benchmarking wird in Prozess-/Strategie und Produkt-/Service unterschieden (Abbildung 24).

	Processes/ Strategies	Products/ Services
Internal	Benchmarking a company's processes/strategies against internal targets/goals and rate international improvements.	Benchmarking products/services against previous models/generations in order to check targets/goals and rate improvements.
External	Benchmarking a company's processes/strategies against those of competitors in order to determine and assess possible future strategies.	Benchmarking products/services against those of the competition in order to generate improvement options and gain competitive advantages.

Abbildung 24: Benchmarking (nach Crul und Diehl, S. 73.)

Die Matrix wird unter den folgenden Kriterien, die für jedes Projekt individuell quantifiziert werden müssen, aufbereitet und ausgewertet:

- The scientific perspective of environment (z.B. LCA),
- The government perspective of environment (z.B. Gesetzgebung) und
- The customer perspective of environment (z.B. Gesundheit und Sicherheit).

Damit sind die Voraussetzungen zur Anwendung in der operativen Ebene geschaffen. Diese kann wie folgt beschrieben werden.

Design for Sustainability auf operativer Ebene

Ökologische Anforderungen können auf der operativen Ebene in den Produktentwicklungsprozess durch angepasste Quality Function Deployment (QFD) Methoden, durch Product Life Cycle Assessment (LCA) und für bestimmte Anwendungsfälle durch den Environmental Performance Indicator (EPI) beachtet werden. Diese Tätigkeiten können durch eine Schätzung der Lebenszykluskosten (LCC) und des Health Impacts erweitert werden. Zu unterstützender Software gehören BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) vom National Institute for Standards and Technology (NIST) und Design for Environment Software. (Jawahir et al. 2006, S. 422)

Auch D4S stellt auf der operativen Ebene eine breitere Anzahl von Methoden bereit, die sich wiederum bewährter und angepasster Methoden und Werkzeuge bedienen, die zur erfolgreichen Integration von Nachhaltigkeit führen. Die (D4S) Ideengenerierungsphase stellt die kreative Komponente des (D4S) Produktentwicklungsprozesses dar. Es werden zunächst Suchfelder aus den Möglichkeiten des Marktes und den Stärken der Organisation, mit Hilfe einer SWOT-Analyse, gebildet. In kreativen Treffen werden mit Hilfe von Kreativitätstechniken Ideen generiert und gesammelt. Diese werden selektiert und es wird ein Businessplan entworfen. In der Realisationsphase finden der eigentliche Designprozess, sowie Produktions- und Marketingplanung statt (Crul und Diehl 2009, S. 31ff.). Der D4S Redesign-Ansatz lässt sich in zehn Schritte einteilen. In Schritt 1 wird das Team zusammengestellt und das Projekt geplant. In Schritt 2 wird eine SWOT-Analyse durchgeführt, sowie Treiber und Ziele zusammengetragen. Schritt 3 beinhaltet die Auswahl des Produktes. In Schritt 4 werden die Treiber aus Schritt 2 mit den Produkthanforderungen abgeglichen. Danach folgt die Analyse der Einflussfaktoren (Schritt 5) und die Auswahl von Handlungsstrategien zur Verbesserung der Nachhaltigkeit (Schritt 6). Es folgt eine entsprechende Ideen-Generierung in Schritt 7 und ihre Auswahl. In Schritt 8 werden die Lösungsansätze entwickelt und in Schritt 9 bewertet. Mit Schritt 10 beginnt der Bau des Prototyps. (Crul und Diehl 2009, S. 59ff.)

Der D4S-Benchmarkingansatz ist eine Methode, mit der Leistung der Produkte und Dienstleistungen einer Organisation unter Kriterien von Nachhaltigkeit mit denen der Konkurrenz

verglichen werden kann. Dabei ist der Fokus stärker auf ökologische als auf soziale Nachhaltigkeit gerichtet. Auf diese Weise soll von anderen Produkten gelernt werden und das eigene Produkt verbessert werden (Crul und Diehl 2009, S. 74).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es sich bei DfS und D4S um Vorgehensweisen für den Produktentwicklungsprozess handelt. Der Produktentwickler trifft dabei Entscheidungen bezüglich des Ressourceneinsatzes, der Produktverwendung, der Produktionsstandorte und der Kommunikation. Die Ansätze beinhalten eine Vielzahl von konkreten Methoden und Werkzeugen. Es lassen sich auf der normativen Ebene und strategischen Ebene Handlungsanweisungen identifizieren, während auf der operativen Ebene das Spektrum an existierenden Methoden und Werkzeugen genutzt wird.

3.1.2.5 Life Cycle Assessment

In den späten 1960er Jahren wurden erste – und aus heutiger Sicht unvollständige – Methoden und Werkzeuge zur Ökobilanzierung (im Englischen Life Cycle Assessment, LCA) entwickelt und eingesetzt. Diese dienten zum Vergleich der ökologischen Belastung von Konsumgütern. Die anschließende kontinuierliche Weiterentwicklung von LCA Methoden und Werkzeugen floss in die Normen ISO 14040 und 14044 ein. (Guinée et al. 2011, S. 90f.)

Ziel der LCA nach ISO 14040 ist die Analyse von Umweltaspekten und -wirkungen von Produktsystemen (Klöpper und Grahl 2009, S. 1). Der Produktbegriff umfasst hierbei sowohl physische Produkte als auch Dienstleistungen. Alle Umweltwirkungen werden über den gesamten Lebenszyklus des Produkts (cradle-to-cradle) analysiert (Klöpper und Grahl 2009, S. 2f.). Nach ISO 14040 unterteilt sich die Ökobilanz in vier Arbeitsschritte.

- Phase I, Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, umfasst die Definition von Anwendungszweck, Systemgrenzen sowie des Detaillierungsgrades der Ökobilanzstudie (DIN 2009, S. 4f.).
- Zur anschließenden Erstellung der Sachbilanz in Phase II, Life Cycle Inventory (LCI), werden stoffliche und energetische In- und Outputs eines Produkts entlang seines Lebenszyklus quantitativ erfasst (DIN 2009, S. 4f.; Klöpper und Grahl 2009, S. 63).
- Die Wirkungsabschätzung in Phase III, Life Cycle Impact Assessment (LCIA), unterstützt die Einschätzung potenzieller Umweltwirkungen aus den Ergebnissen der Sachbilanz, u.a. durch Aggregation der Stoff- und Energieströme (DIN 2009, S. 5; Klöpper und Grahl 2009, S. 195f.).
- Die abschließende Phase IV der Auswertung, die Interpretation, diskutiert Ergebnisse von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung hinsichtlich der Übereinstimmung mit Ziel-

stellung und Untersuchungsrahmen. Auf dieser Grundlage können Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Entscheidungshilfen abgeleitet werden (DIN 2009, S. 5).

In der Literatur existieren zahlreiche Forschungsansätze zur Anwendung der LCA in der Produktentstehung, z.B. (Nielsen und Wenzel 2002; Tingström und Karlsson 2006). Vorteile der LCA bei der Anwendung im Rahmen der Produktentstehung liegen im quantitativen, lebenszyklusorientierten Ansatz, welcher besonders bei komplexen Produkten auch Stoff- und Energieströme aufzeigen kann, die von anderen Methoden nicht erfasst werden können. Zudem können Umwelteinflüsse verschiedener Lebenszyklusphasen ermittelt und somit Priorisierungen zwischen untersuchten Alternativen vorgenommen werden. Erreichte umweltrelevante Verbesserungen können quantitativ abgebildet werden. Durch das standardisierte Vorgehen und objektive Messgrößen ist eine Möglichkeit der Ergebniskommunikation gegeben (Nielsen und Wenzel 2002, S. 247; Tingström und Karlsson 2006, S. 1414).

Collado-Ruiz und Ostad-Ahmad-Ghorabi geben einen Überblick über die Barrieren der Integration der LCA in die Produktentstehung. Zunächst ist eine Anleitung der Konstrukteure bei der Ermittlung der ökologischen Leistungsfähigkeit ihres Produkts notwendig, da hier meist noch Erfahrungsdefizite bestehen. Zugleich ist für eine solche Bewertung bereits ein Produktmodell für das noch zu konstruierende Produkt erforderlich. Hier kann mit Hilfe von Vorgängerprodukten, Benchmarks und Abschätzungen der voraussichtlichen Produktgestalt gearbeitet werden. Zusätzlich kann die Nutzung eines komplexen LCA-Modells in den frühen Phasen die Kreativität des Konstrukteurs, und damit die Innovation, beeinträchtigen. (Collado-Ruiz und Ostad-Ahmad-Ghorabi 2013, S. 31f.)

Weitere Barrieren zur Durchführung einer LCA umfassen Komplexität und Zeitaufwand, insbesondere bei der Analyse von Neuprodukten, einen hohen Datenbedarf und hohe benötigte Datenqualität, Unsicherheit der Ergebnisse sowie mangelnde Vergleichbarkeit zu anderen LCA-Studien (Tingström und Karlsson 2006, S. 1414; Collado-Ruiz und Ostad-Ahmad-Ghorabi 2013, S. 32). Millet et al. kommen aufgrund technischer und organisatorischer Unsicherheiten bei der Anwendung der LCA zu dem Ergebnis, dass diese nur zum Beginn und Ende der Produktentstehung zur Herbeiführung von Entscheidungen genutzt werden kann. Die LCA mit ihren Grundprinzipien und Ergebnissen sollte hierbei als Grundlage zur Entwicklung methodisch verständlicher Prinzipien und Werkzeugen zur Unterstützung von Konstrukteuren im Produktentstehungsprozess dienen. (Millet et al. 2007, S. 344)

Aus Sicht des Lebenszyklusmodells (Begin of Life, Mid of Life, End of Life, vgl. Abbildung 18) offenbart sich trotz des hohen Verbreitungs- und Detaillierungsgrads die Schwäche vom derzeitigen LCA hinsichtlich der Unterstützung des Konstruktionsprozesses. Es müssen verschie-

dene LCA angefertigt werden, um beispielsweise herauszufinden, ob die Nutzung eines energetisch ineffizienten Produktes über die Nutzungsdauer nachhaltiger ist, als die Produktion eines energetisch effizienteren Produktes mit seltenen Erden. Dabei ist die Wahl der Systemgrenzen (Betrachtungsrahmen der LCA) entscheidend. Die LCA-Ergebnisse müssen demnach vom Entwicklungsverantwortlichen einer qualitativen Analyse unterzogen werden. Je nach Wissens- und Erfahrungsstand der verantwortlichen Person können anschließend Maßnahmen zur Produktverbesserung definiert und umgesetzt werden. Im größeren Rahmen einer Produktentwicklung müssen gegebenenfalls auch Vorprozessketten und nachgelagerte Phasen bzw. Annahmen (z.B. Nutzungsdauer) verändert werden, um Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

Die zuvor beschriebene klassische LCA wird über eine Social Lifecycle Assessment (SLCA) auf die soziale Dimension der Nachhaltigkeit erweitert. Nach Definition der UNEP beschreibt SLCA eine Methode zur Bewertung sozialer und sozio-ökonomischer Wirkungen entlang des gesamten Lebenszyklus von Produkten und Dienstleistungen (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2009, S. 37). Im Gegensatz zur etablierten und standardisierten LCA ist die SLCA noch in einem frühen Forschungsstadium (Finkbeiner et al. 2010). Eine Übersicht von existierenden SLCA-Ansätzen und deren Integrierbarkeit in das Vorgehensmodell der LCA stellen Jørgensen et al. bereit. Hierbei wird angemerkt, dass noch keine Übereinstimmung bezüglich grundlegender Sachverhalte vorliegt. Diese umfassen die zu betrachtenden Wirkungskategorien, anzuwendende Messverfahren sowie den notwendigen Detailgrad der Datenerhebung (Jørgensen et al. 2008, S. 102f.). In einer Veröffentlichung von UNEP und SETAC werden Richtlinien für die Anwendung der SLCA vorgestellt. Es wird ein Grundgerüst der Anwendung der SLCA, angelehnt an die LCA nach ISO 14040, vorgestellt. Zusätzlich erfolgt eine Auflistung der Forschungslücken entlang der von der ISO 14040 vorgegebenen Struktur (UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2009). Dem in der derzeitigen Forschung dominierenden Bottom-Up-Ansatz, welcher das Ziel eines erhöhten Verständnisses der Anwendung der SLCA verfolgt und in zahlreichen Fallstudien resultiert, z.B. (Feschet et al. 2013), stellt Jørgensen die Notwendigkeit eines Top-Down-Ansatz gegenüber. Insbesondere hebt er die Funktion der SLCA zur Unterstützung der Entscheidungsfindung sozialer Auswirkungen des Produktlebenszyklus hervor. Um diese zu gewährleisten, erscheint neben der Betrachtung der realisierten Produktlebenszyklen auch eine Erweiterung der Analyse auf nicht-realisierte Lebenszyklen notwendig. Als weiteres zentrales Problem auf dem Weg zu einer breiteren Anwendung der SLCA stellt sich die derzeit vorliegende mangelhafte Datenverfügbarkeit dar (Jørgensen 2013, S. 296).

3.1.2.6 Environmental Management Systems

Organisationen befassen sich zunehmend damit, wie ökologische Ziele erreicht und kommuniziert werden können. Um die Umweltauswirkungen ihrer Aktivitäten, Produkte und Dienstleistungen in Verbindung mit Unternehmenszielen und -grundsätzen zu messen und zu steuern, bedienen sie sich unterschiedlicher Möglichkeiten. So werden beispielsweise unternehmensinterne Audits und Reviews eingeführt. Allerdings garantieren diese Maßnahmen aber in der Regel nicht ausreichend genug, dass Gesetze und Richtlinien tatsächlich eingehalten werden. Aus diesem Grund werden im Rahmen der Richtlinie ISO 14001¹⁰ so genannte Environmental Management Systems (EMS) eingeführt. Diese sollen Unternehmen dahingehend unterstützen, Gesetzesvorgaben und Richtlinien besser einzuhalten und ihre Aktivitäten in Einklang mit ökologischen und ökonomischen Zielsetzungen zu bringen. Dazu wurde auf methodischer Ebene ein Modell basierend auf den Plan-Do-Check-Act (PDCA) Ansatz entwickelt (Abbildung 25).

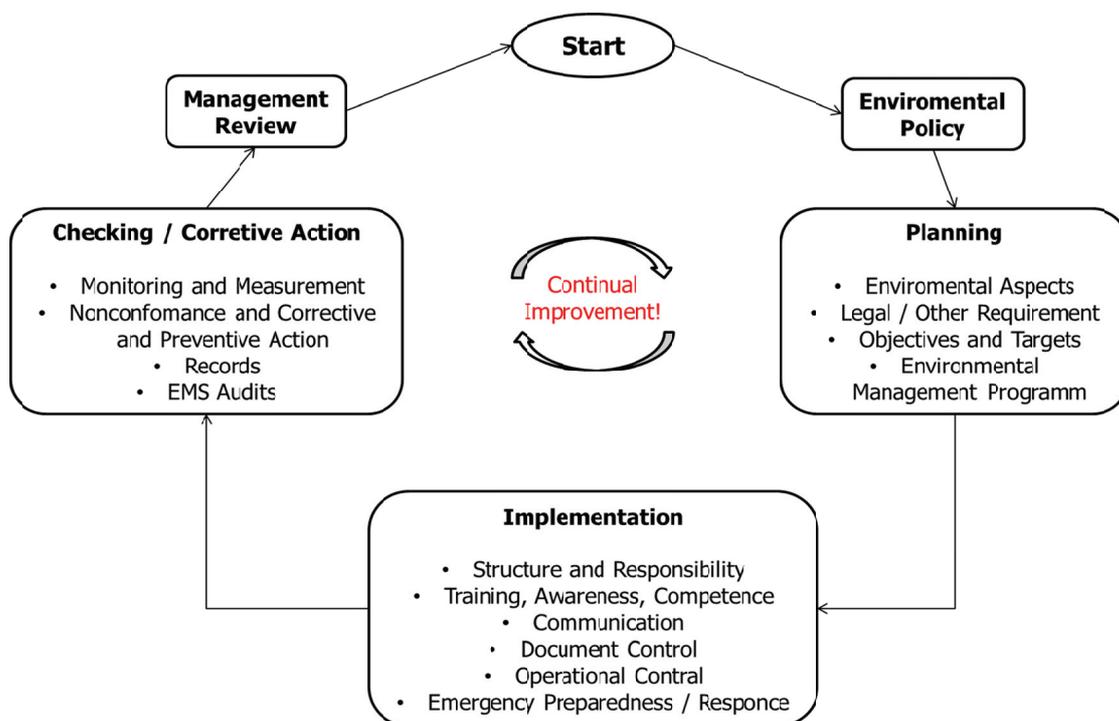


Abbildung 25: Modell des Environmental Management Systems (ISO 14001, S. vi)

Environmental Management Systems auf normativer Ebene

Der methodische Ansatz von Environmental Management Systems soll in unterschiedlichen Unternehmen unterschiedlicher Größe eingesetzt werden können und gleichermaßen geografische, kulturelle und soziale Randbedingungen berücksichtigen. Ziel ist es, dass ein Unternehmen verbindliche ökologische Richtlinien und Zielsetzungen aufstellt und Prozesse defi-

¹⁰ ISO 14001:2004: „Environmental Management Systems – Requirements with guidance for use“

niert, wie diese Zielsetzungen eingehalten werden können. Weiterhin unterstützt die ISO 14001 das methodische Vorgehen, entsprechende Aktivitäten im Unternehmen zu verbessern und die Konformität zu Gesetzesvorgaben und -richtlinien zu demonstrieren. Die ISO 14001 sagt allerdings auch aus, dass der Erfolg von EMS maßgeblich von der Verbindlichkeit aller Unternehmensebenen und -funktionen, insbesondere vom Management, abhängig ist.

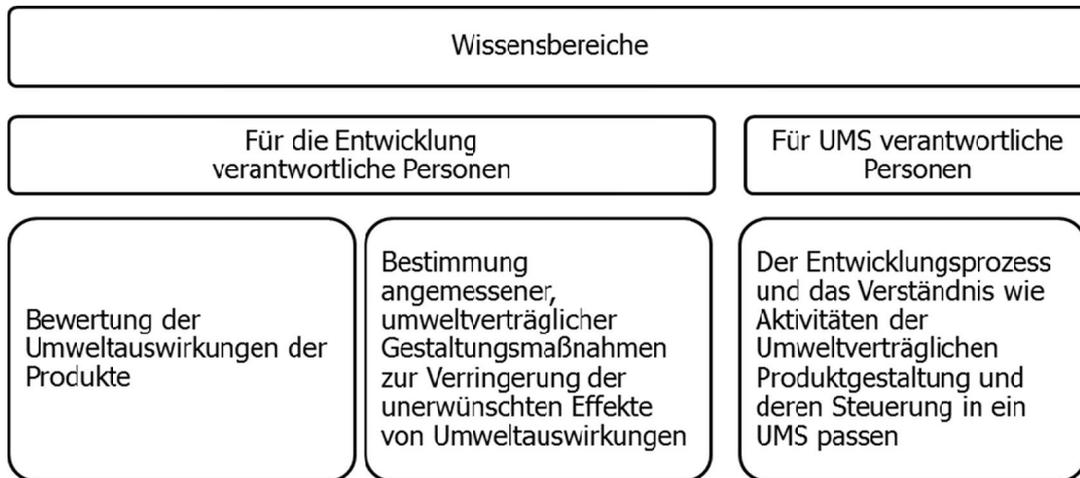


Abbildung 26: Wissensbereiche von Umweltmanagementsystemen (ISO 14006)

Die Umweltmanagementsysteme (UMS) nach ISO 14006¹¹ beziehen sich auf die Integration von umweltverträglichen Produkten; sie nehmen die Umweltauswirkungen in den Unternehmen in den Blick. Die Entwicklung eines Produktes muss in ein UMS einbezogen werden, da sie einen bedeutenden Einfluss auf die Umweltauswirkungen eines Produktes hat. Um die umweltverträgliche Produktgestaltung in ein UMS einzubinden, sind drei Wissensbereiche, wie in Abbildung 26 dargestellt, notwendig.

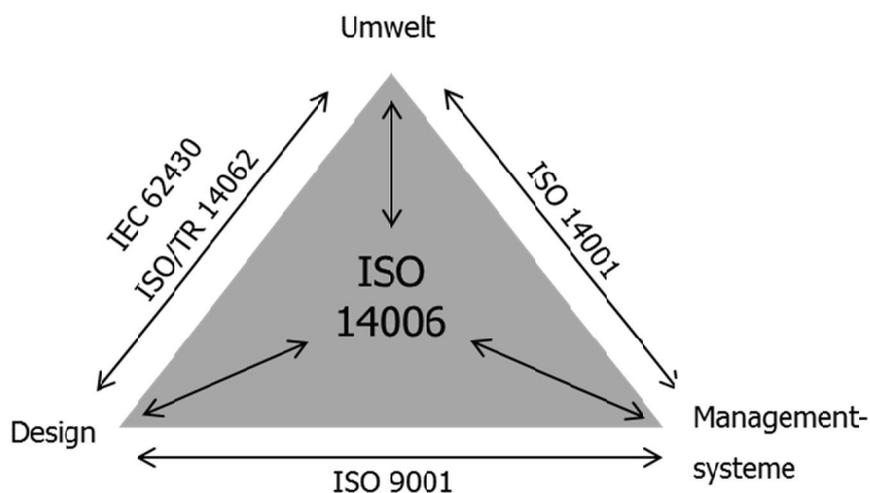


Abbildung 27: Verbindung gültiger Normen zur ISO 14006 (ISO 14006)

¹¹ ISO 14006:2011: „Environmental management systems - Guidelines for incorporating ecodesign“

Die internationale Norm ISO 14006 dient der Verbindung dieser drei Wissensbereiche und stellt weitere Normen und ihre Geltungsbereiche wie in Abbildung 27 dargestellt in den Zusammenhang.

Environmental Management Systems auf strategischer Ebene

Zu den strategischen Aspekten gehören folgende sechs Punkte, die auf der Grundlage einer Managementbewertung auszuführen sind (ISO 14006):

1. Strategische Projektplanung und die Einbindung der umweltverträglichen Produktgestaltung soll in alle Arbeitsabläufe der Organisation: Hierbei gilt es zum einen, diejenigen Umweltaspekte (In-/ Outputs) zu bestimmen und zu bewerten, die überwacht und beeinflusst werden sollen. Zum anderen müssen alle rechtlichen Verpflichtungen und Anforderungen geprüft werden.
2. Zuweisung von menschlichen, technischen und finanziellen Mitteln für die Planung, Umsetzung und Verbesserung der umweltverträglichen Produktgestaltung: Die Aufmerksamkeit soll hier auf die Akteure gerichtet werden, die in den Produktentwicklungsprozess einbezogen werden. Darauf aufbauend sollen Verbesserungsstrategien von verantwortlichen Personen bestimmt und bewertet werden. Zudem müssen Unternehmen bezüglich rechtlicher Grundlagen und In-/ Outputs kommuniziert werden. Diese Kommunikation ist zu dokumentieren.
3. Externe Marktänderungen, die durch den technischen Fortschritt, die Verbesserungen des Produktsystems und die Lenkung der Versorgungskette erzielt werden: Wird die Aufgabe der Produktentwicklung ausgelagert, so müssen die externen Unternehmen über die Vorgehensweise bei umweltverträglicher Produktgestaltung in Kenntnis gesetzt werden.
4. Festlegung von Zielsetzungen für die Umwelleistungen: Diese Zielsetzungen können horizontal (zutreffende auf alle Produktarten einer Organisation), produktspezifisch oder in Bezug auf den Prozess der umweltverträglichen Produktgestaltung sein. Es ist notwendig, die Entwicklungszielsetzungen (Funktion, Zugänglichkeit, Wartung) zu berücksichtigen, um die behördlichen Anforderungen nicht zu verletzen.
5. Förderung von Neuerungen und der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle
6. Beitrag der Wertschöpfung

Environmental Management Systems auf operativer Ebene

Auf der operativen Ebene geht es um die Lenkung der internen Prozesse. In diesem Zusammenhang lassen sich folgende vier zentrale Aktivitäten benennen (ISO 14006):

1. Einbindung und Verwirklichung der gewählten Strategie in allen relevanten Verfahren, Programmen und Strategieplänen: Hierzu muss die Umweltbetrachtung in die Entwicklungsphasen eingebunden werden. Das Unternehmen muss festlegen, welche Stufen der Bewertung, Verifizierung und Validierung genutzt werden sollen.
2. Sicherstellung eines funktionsübergreifenden Ansatzes
3. Einbezug der gewählten Gestaltungsstrategie in die gesamte vorgelagerte und nachgeschaltete Wertschöpfungskette: Die Ergebnisse des Produktentwicklungsprozesses sollen so zur Verfügung gestellt werden, dass eine vergleichende Verifizierung mit den Entwicklungseingaben möglich ist. Mit geplanten Regelungen soll in den geeigneten Phasen systematische Entwicklungsbewertungen durchgeführt und dabei aufgezeigt werden, dass sich in keiner Phase die verbesserte Umweltauswirkung nachteilig für eine andere entwickelt.
4. Förderung einer wechselseitigen Kommunikation in der internen und externen Wertschöpfungskette: Eine derartige Förderung ist z.B. anhand eines Leistungsmesssystems möglich, das Managementleistungskennzahlen oder operative Leistungskennzahlen in Bezug auf die Umweltleistung umfasst.

Environmental Management Systeme, so kann schließlich zusammenfassend festgestellt werden, lassen sich nach dem Plan-Do-Check-Act Zyklus in Unternehmen integrieren. Dieser Integrationszyklus macht es möglich, nicht nur die reinen Aktivitäten der Produktentwicklung zu unterstützen, sondern alle Bereiche eines Unternehmens, die zur Entwicklung von Produkten beitragen. Konkrete Verbesserungen und Methoden zur Verbesserung werden im Rahmen von Environmental Management Systems auf Produktentwicklungsebene nicht vorgeschlagen.

3.2 Wissensverarbeitung und Informationstechnologien

3.2.1 Begriffsbestimmung und Einordnung

Aus traditioneller Sicht heraus wird unter Wissensverarbeitung in einem informationstechnischen System (engl. Knowledge Engineering) das Externalisieren von Experten- bzw. Personenwissen verstanden (Schreiber et al. 2000, S. 15). Informations- und Kommunikationstechnologien unterstützen die Anwender darin, Wissen zu externalisieren. Nach einem bestimmten Muster in ein informationstechnisches System eingegeben, kann dieses Fach- und Methodenwissen weiter verarbeitet und schließlich Dritten zugänglich gemacht werden. Auf diesem Weg kann sich Wissen verbreiten, von anderen wieder angewandt und weiterentwickelt werden.

Das System generiert im Idealfall, in dem es neues mit bekanntem Wissen abgleicht, neues Fachwissen (Nonaka und Takeuchi 1995, S. 64f.). Dies hat sich allerdings in der Vergangenheit als wenig erfolgreich erwiesen. Heutzutage wird Wissensverarbeitung als modellbildende Aktivität angegangen, wobei das Modell genau dem abstrahierten Teil der Realität entspricht, in dessen Umfeld ein Problem gelöst werden soll. Eine abstrakte und generische Modellbildung ist sinnvoll, weil das Detailwissen von Experten meist nicht in dem Maße verfügbar bzw. zugänglich ist, das einen vollständigen Überblick erlaubt. Zugleich wird in den meisten Fällen nicht das gesamte Expertenwissen für ein bestimmtes Projektziel benötigt. (Schreiber et al. 2000, S. 15f.)

Die Forschungsarbeiten im Bereich der Wissensverarbeitung und der Informationstechnologien lassen sich hauptsächlich den folgenden Ebenen zuordnen:

- III. Informationstechnologien und Werkzeuge sowie
- IV. Informationsartefakte und -standards.

Dementsprechend wird nachfolgend der relevante Stand der Technik erhoben, der zur Beantwortung der folgenden Forschungsfragen dient:

3. Welche Informationstechnologien und Werkzeuge können in welchem Zusammenhang die Produktentwicklung unterstützen?
4. Welche Informationsartefakte und -standards müssen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte erstellt werden und wie können (Nachhaltigkeits-) Informationen sinnvoll vernetzt werden?

3.2.2 Relevante Forschungsarbeiten und existierende Technologien

3.2.2.1 *Software*

Einige Methoden zur Entwicklung nachhaltiger Produkte (vgl. Kapitel 3.1.2) werden durch entsprechende Software unterstützt. Die informationstechnische Unterstützung erfolgt meist dann, wenn mehrere Zwischenrechnungen notwendig sind oder komplexe Algorithmen angewandt werden müssen. In anderen Fällen wird Software aber nur eingesetzt, um die Anwendung der Methode für den Nutzer komfortabler zu gestalten, indem beispielsweise durch den Prozess geführt wird.

Im Folgenden wird, stellvertretend für die in der wissenschaftlichen Literatur beschriebene hohe Anzahl existierender Softwareunterstützung, auf drei repräsentative Arbeiten eingegangen. Sie dienen der Verdeutlichung vom Einsatz informationstechnischer Werkzeuge, die die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Methoden und Ansätze unterstützen.

Design-for-Environment Evaluation Tool (D4N)

Das im Jahr 1995 zum ersten Mal von Spicer und Wang vorgestellte Environmental Design Industrial Template (EDIT), wurde über mehrere Jahre weiterentwickelt und 1997 erneut von den Autoren präsentiert (Spicer und Wang 1995, Spicer und Wang 1997). Es bildet zudem die Grundlage für Ansätze Environmental Decision Support Tool (EDST) und Design-for-Environment Evaluation Tool (D4N).

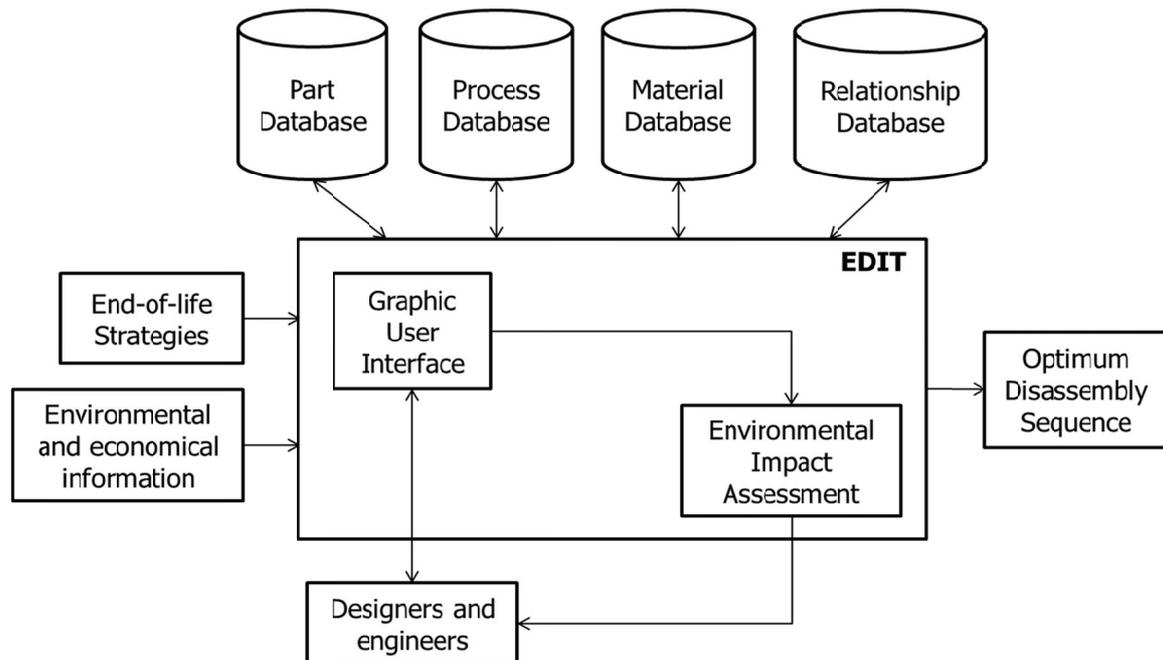


Abbildung 28: Struktureller Aufbau des Environmental Design Industrial Template (EDIT) (Pigozzo et al. 2010a)

Die Herangehensweise des EDIT ist stark ökonomisch geprägt. Zur Formulierung ihrer Grundannahme argumentieren die Autoren dabei aus Sicht der für die Entsorgung von Produkten zuständigen Institutionen. Diese würden Produktkomponenten nur soweit einer neuen Nutzungsphase zuführen, wie es sich auch wirtschaftlich lohnt. Das heißt im Umkehrschluss, dass bei verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung des Demontageplans diejenige Konfiguration bevorzugt werden würde, die den Profit des Recyclingunternehmens maximiert. Der Demontageplan ist dabei als eine Funktion aus derzeitiger Wirtschaftslage und der Produktstruktur definiert. Die Hauptfunktion des EDITs ist eine Simulation der optimalen Demontagesequenz und eine Analyse der daraus entstehenden ökologischen Effekte (Abbildung 28).

Informationstechnisch wird dieses abstrakte Konzept als rekursive Funktion abgebildet, die für jede Komponente den optimalen Weg der Nachbearbeitung (Wiederaufarbeitung, Entsorgung, Recycling) aufzeigt. Das entsprechende Kriterium hierfür ist der Recovery Value, der

aus den Gewinnen abzüglich der Aufwände von verschiedenen EOL-Optionen berechnet wird. Der mögliche Gesamtgewinn des generierten Demontageplans wird durch eine Aggregation der verschiedenen Recovery Values bestimmt. Wird das Produktdesign angepasst, können die Auswirkungen auf die EOL-Phase dann direkt an diesem Wert abgelesen werden. Außerdem verdeutlichen einige Indikatoren, wie z.B. die recovery/loss ratio, die ökologischen Auswirkungen des Produktkonzeptes. (Pigosso et al. 2010a)

Der Ansatz EDST wurde 1999 von Yu et al. vorgestellt. Das Tool dient vor allem dazu, die Konstruktion schon während der Produktentwicklung so anzupassen, dass die EOL-Phase des Produktes optimiert wird. Grundsätzlich baut das Tool auf einem Demontagemodell des Produktes auf. Aus CAD-Daten und einer Materialdatenbank werden die hierfür notwendigen Daten gewonnen und mit Hilfe der Graphentheorie verknüpft. Aus dem Modell können dann vielfältige Informationen zu Demontagevorgängen (z.B. Dauer, Komplexität, Anzahl der Komponenten) und zur Nachbehandlung der verwendeten Materialien (z.B. Menge von produziertem Müll, davon toxischer/recyclbarer Anteil) gewonnen werden. (Yu et al. 1999, Pigosso et al. 2010a)

D4N wurde 1999 von Murtagh et al. als Ergebnis einer Kooperation von Mitarbeitern der Mitsubishi Corporation und der Applied Engineering Corporation vorgestellt (Abbildung 29).

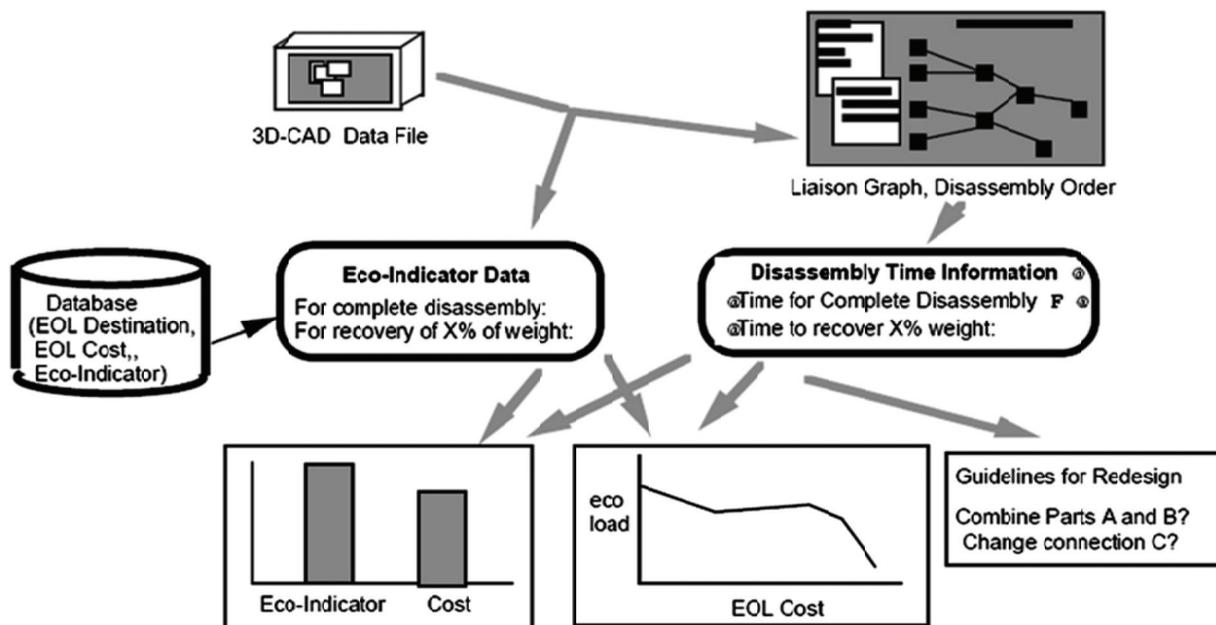


Abbildung 29: Modell des Design-for-Environment Evaluation Tool (D4N) (Pigosso et al. 2010a)

Ähnlich wie das EDST basiert D4N auf einem Modell, das auf CAD-Daten von Komponenten bzw. Baugruppen zugreift. Auch hier werden die Produktdaten durch eine Datenbank ergänzt, aus der standardisierte Informationen gewonnen werden können (z.B. Werkstoffdaten). Das Tool nutzt zwei Indikatoren zur Bewertung der aktuellen Produktkonfiguration. Der

Eco-Indikator misst die ökologischen EOL-Auswirkungen des Produkts anhand der verwendeten Materialien. Nach einem ähnlichen Prinzip werden die EOL-Kosten als zweiter Indikator berechnet. Dieser umfasst die Kosten für Demontage und Entsorgung der Komponenten sowie für deren Aufbereitung zum Recycling. Das System berechnet die Demontagerihenfolge der Baugruppen bis zu dem Punkt, an dem keine Demontage mehr möglich ist und die für die Demontage benötigte Zeit. Es wird davon ausgegangen, dass mit höherem Demontageaufwand die verschiedenen Einzelteile besser recycelt werden können. Gleichzeitig steigen aber die EOL-Kosten, da mehr Personalaufwand notwendig wird. Der Entwickler soll durch Abwägung dieser verschiedenen Dimensionen eine Hilfestellung bekommen, um die optimale Produktkonfiguration im Zielkonflikt zwischen ökonomischen und ökologischen Anforderungen zu generieren. (Murtagh et al. 1999, Pigosso et al. 2010b)

Aus dem strukturellen Aufbau von EDIT (Abbildung 28) lässt sich bereits für die informationstechnische Betrachtung erkennen, dass zur Nachhaltigkeitsbeeinflussung und -beurteilung, in diesem Fall eingeschränkt auf die ökologische Sicht, ein wissensverarbeitendes System benötigt wird, das an verschiedene Datenbanken angebunden ist. Darüber weist das Modell des D4N auf die Anbindung von CAD-Modellen als Voraussetzung zur Nachhaltigkeitsbeurteilung hin. Das informationstechnische System stellt nach der Beurteilung konkrete Vorschläge zur Verbesserung des Produktmodells vor.

Green Design Advisor (GDA)

Der Green Design Advisor (GDA) wurde 1999 von Feldmann et al. präsentiert. Es handelt sich um eine Eigenentwicklung von Motorola. Ziel des GDA ist eine Analyse des Produkts hinsichtlich des Energie- und Ressourcenverbrauches, der Eignung zur Demontage und der Toxizität von Komponenten. Gemessen wird dies anhand mehrerer Kriterien, wie z.B. der Anzahl und Masse der verwendeten Materialien, dem Umfang des recycelbaren Anteils und der Dauer bzw. Kosten der Demontagevorgänge. Mehrere Kriterien können direkt vom Nutzer anhand der Modellierung eines Produktmodells erhoben werden (z.B. Anzahl der Komponenten). Dazu müssen die verschiedenen Komponenten durch das verwendete Material und dessen Masse definiert werden. Anschließend werden die Komponenten hierarchisch angeordnet und zu einer Produktstruktur verknüpft. Die Beziehungen zwischen den Komponenten (z.B. Art der Verbindung) müssen ebenfalls bestimmt werden. Eine zweite Kategorie von Kriterien kann durch die Anbindung einer Datenbank abgerufen werden. Hier handelt es sich vor allem um standardisierte Materialdaten, wie z.B. die Toxizität. Die fehlenden Kriterien (Recyclebarkeit, Dauer und Kosten der Demontage) werden anhand einer Simulation der Demontage des Produkts und des anschließenden Recyclings hinzugefügt. Um die Recycling-

vorgänge abzubilden, werden die Komponenten im Rahmen der Simulation in virtuelle Boxen einsortiert. Diese Boxen sind den Behältnissen in realen Recyclingunternehmen nachempfunden, in denen sich nur gleiche Stoffe befinden. Durch vordefinierte Regeln, welche Stoffe in welche Boxen sortiert werden, wird eine virtuelle Trennung der Materialien erreicht. Berechnet werden dabei die Zeit für die Demontage und die Kosten für das Recycling anhand der Arbeitszeit des Recyclingpersonals, der Prozesskosten und der Erlöse für Entsorgung bzw. Verkauf von Materialien. Das System errechnet dabei eine optimale Demontagetiefe. Letztendlich werden die Ergebnisse für alle Kriterien in einem Netzdiagramm dargestellt. Das System verfügt über einen Optimierungsalgorithmus, der, ausgehend von den identifizierten Schwachstellen, Verbesserungen am Produktdesign durchführt. (Feldmann et al. 1999)

Der Ansatz des GDA zeigt die Notwendigkeit der Verknüpfung von Informationen mit den Objekten einer Produktstruktur zur Nachhaltigkeitsbeurteilung auf. Darüber hinaus wird beschrieben, dass eine Anbindung an eine Datenbank mit Nachhaltigkeitsinformationen erforderlich ist. Als Erweiterung des Ansatzes im Vergleich zum vorher beschriebenen EDIT sind die Integration von Regeln und die Simulation zur Nachhaltigkeitsbeurteilung anzusehen.

ProdTect

Das Tool ProdTect wurde von Herrmann et al. als Kooperation des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig und des Beratungsunternehmens Kerp-Engineering entwickelt und im Jahr 2005 erstmals vorgestellt. In den darauffolgenden Jahren wurde ProdTect mehrfach weiterentwickelt und mit anderen Systemen zusammengeführt (siehe Herrmann et al. 2006a; Herrmann et al. 2008; Frad und Revnic 2007). Zeitweise war das Tool kommerziell erhältlich und wurde aktiv zu Forschungszwecken angewendet (z.B. von Santini et al. 2010; Fan et al. 2013). Auch andere Autoren nutzten ProdTect als Basis für eigene Systementwicklungen (z.B. Chiotellis et al. 2008).

ProdTect greift die Ansätze von anderen EOL-orientierten Softwaresystemen auf. So besteht das Ziel ebenfalls darin, dem Konstrukteur Hilfsmittel an die Hand zu geben, mit denen er das Ende des Lebensweges seiner Produkte aus ökologischer Sicht positiv beeinflussen kann. Das Produkt wird über die Definition von Komponenten und deren Beziehungen modelliert. Eine Übersicht des gesamten Bewertungsvorgehens ist in Abbildung 30 dargestellt. Die optimale Demontagetiefe sowie die Recyclingrate werden aus einer Abwägung von EOL-Erlösen gegenüber den dafür notwendigen Demontagekosten ermittelt. Da jeder Demontageschritt Kosten verursacht, erkennt das System, dass materialgleiche Baugruppen, die zusammen weiterverarbeitet werden können, nicht zuerst demontiert werden müssen. Außerdem ist es möglich, verschiedene Szenarien (z.B. Kostenoptimierung, maximale Recyclingrate etc.) zu

wählen, die bei der Optimierung beachtet werden sollen. Ein wesentlicher Unterschied von ProdTect zu den anderen beschriebenen Systemen liegt in der gleichzeitigen Betrachtung von Produkt und Prozess. (Herrmann et al. 2006a)

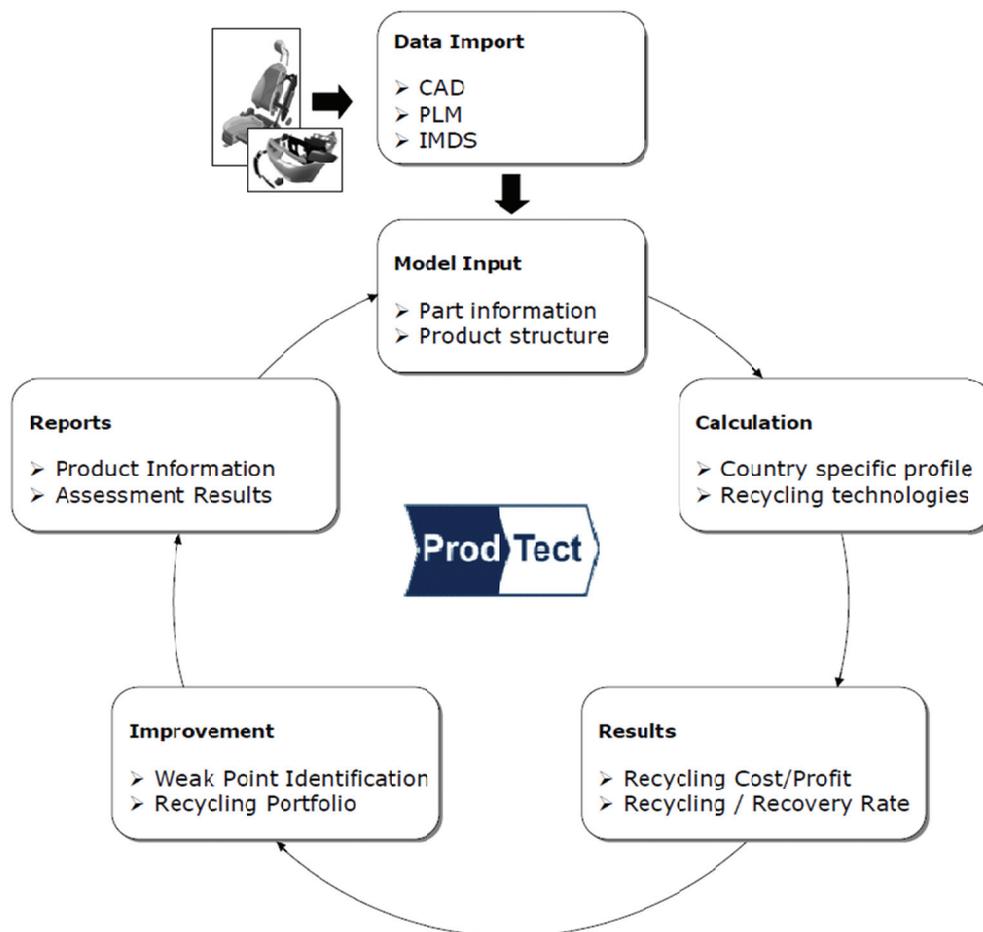


Abbildung 30: Bewertungsvorgehen in ProdTect (Frad und Revnic 2007)

Da sich die Voraussetzungen für Recycling, Wiederaufarbeitung oder Energierückgewinnung regional stark unterscheiden, z.B. hinsichtlich Personalkosten, Rohstoffpreisen oder verfügbaren Technologien, bietet das System eine EOL-Profil-Bibliothek an, in der verschiedene Konfigurationen gespeichert sind. Aus diesem Grund wird die EOL-Performance Wertung im System in prozess- und produktbasierte Dimensionen unterschieden. Ein Unternehmen, welches Produkte mit einer recyclingunfreundlichen Produktarchitektur entwirft, kann dies zumindest teilweise durch effektive Aufarbeitung in Recyclingprozessen ausgleichen und umgekehrt. Eine optimale EOL-Performance kann aus einer kombinierten produkt- und prozessbasierten EOL-Optimierung hervorgehen. (Herrmann et al. 2006b)

Zum Erreichen der oben beschriebenen Ziele und der Nutzung der Software ist ProTect an verschiedene informationstechnische Systeme und Datenbanken angebunden. Abbildung 31

zeigt den strukturellen Zusammenhang zwischen der Software ProTect und den angebenen informationstechnischen Systemen (CAD und PDM) und der IMDS-Datenbank über XML.

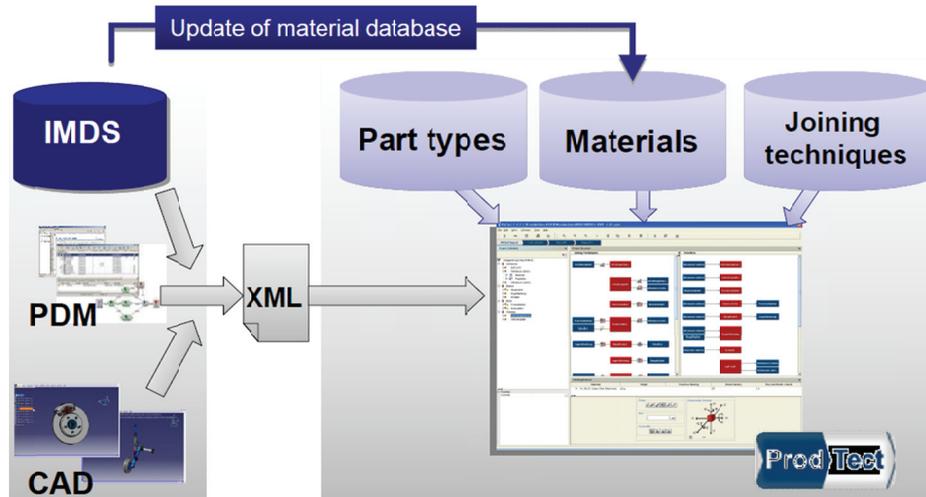


Abbildung 31: Datenimport für ProTect (Frad und Revnic 2007)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ansätze EDIT, GDA und ProTect stellvertretend für weitere Software die Methoden aus Kapitel 3.1 zur Nachhaltigkeitsbeurteilung und -beeinflussung informationstechnisch unterstützen. Dabei gehen sie auf die ökologische und ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit ein. Die Softwareunterstützung kann als wissensverarbeitendes System verstanden werden, das über Schnittstellen zu anderen Systemen und über die Anbindung an Datenbanken mit Informationen versorgt wird. Die Systeme werden eingesetzt, um Vorschläge zur Verbesserung des Produktes zu generieren.

3.2.2.2 Datenbanken

Für die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Produkten sind die Informationen, auf denen die Bewertung aufbaut, von zentraler Bedeutung. Es gibt derzeit vier große Datenbanken, die umfangreiche Informationen bereitstellen. Dazu gehören

- Die Ecoinvent Database von der ecoinvent Association aus der Schweiz,
- Die U.S. Life Cycle Inventory Database von der National Renewable Energy Laboratory (NREL) aus den USA,
- Die Social Hotspots Database von dem New Earth/ Social Hotspots Database project aus den USA und
- Die GaBi LCA Databases von der thinkstep AG aus Deutschland.

Im Folgenden wird auf GaBi LCA Databases und auf die Social Hotspots Database näher eingegangen.

Die Firma thinkstep bietet mit GaBi (Ganzheitliche Bilanzierung) eine der bekanntesten Softwareunterstützung zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten und Prozessen an. Über eine reine Bewertung hinaus werden weitere Funktionen angeboten, die die Methoden aus Kapitel 3.1.2 teilweise informationstechnisch unterstützen. Das gesamte Spektrum der Software lässt sich wie folgt darstellen (GaBi 2016):

- Life Cycle Assessment
 - Design for Environment: Einhalten von gesetzlichen Regelungen
 - Eco-efficiency: Material- und Energienutzung unter ökonomischen Zielen reduzieren
 - Eco-design: Entwicklung von Produkten mit geringerem Umweltfußabdruck, geringeren Treibhausgas-Emissionen, geringerem Wasserverbrauch und geringerem Abfall
 - Efficient value chains: Erhöhen der Effizienz von Wertschöpfungsketten
- Life Cycle Costing
 - Cost reduction: Entwickeln und Optimieren von Produkten unter Kostenaspekten
- Life Cycle Reporting
 - Sustainable Product Marketing: Nachhaltigkeitslabel und Environmental Product Declarations (EPDs)
 - Sustainability Reporting: Umweltkommunikation und Nachhaltigkeits-Reporting
 - LCA knowledge sharing: Reporting und Analyse für unternehmensinterne Bereiche, Management und Zuliefererkette
- Life Cycle Working Environment
 - Responsible manufacturing: Nachhaltige Verantwortung in Produktionsprozesse integrieren

Mit diesen Modulen unterstützt die Software den Anwender beim Verwalten großer Datenmengen und Nachhaltigkeitsinformationen, beim Modellieren von Produktlebenszyklen, bei der Berechnung von Bilanzen unterschiedlicher Art und beim Aufbereiten der Resultate.

Das wesentliche Element der Software ist neben der Softwareunterstützung in den oben beschriebenen Modulen die Anbindung an LCA-Datenbanken, die mehr als 10.000 Datasets beinhalten. Die umfangreichen Datasets ermöglichen erst eine Nachhaltigkeitsbewertung. Als Beispiel kann angeführt werden, dass im Dataset Produktionsprozesse zu 70 Prozessen und 10 Fertigungslinien Nachhaltigkeitsinformationen vorliegen. Ein Prozess davon ist Laser-

schweißen von Aluminium. Hierfür können aus der Datenbank beispielsweise Nachhaltigkeitsinformationen zur Modellierung des Wasserfußabdrucks oder zur Energiebilanzierung abgerufen werden. Die Informationen und Prozessmodelle werden dann in die entsprechenden Module integriert und erlauben über die Anwendung der Methode eine ganzheitliche Bilanzierung (GaBi 2016). Die social hotspots database ist eine online verfügbare Datenbank zu sozialen Risiken weltweit. In 227 Ländern und 57 Wirtschaftssektoren können Nutzer die Datenbank nach sozialen Risiken wie beispielweise die Lage der Menschenrechte und Arbeitsbedingungen in verschiedenen Ländern durchsuchen. Abbildung 32 zeigt das gesamte Spektrum der sozialen Nachhaltigkeitsindikatoren, die die Datenbank abdeckt. (SHDB 2016)

Über das Internet-Portal bietet die social hotspots database drei wesentliche Funktionen an:

- Visualisierung der globalen sozialen Risiken auf einer Karte für einen ausgewählten Indikator,
- Analyse der Risiken für mehrere Indikatoren in einer Supply Chain für ausgewählte länderspezifische Sektoren sowie
- Vergleich der Risiken und Nachhaltigkeitsindikatoren über verschiedene Länder hinweg und Identifizieren des Indikators, der das höchste Risiko in einer Impact-Kategorie besitzt.

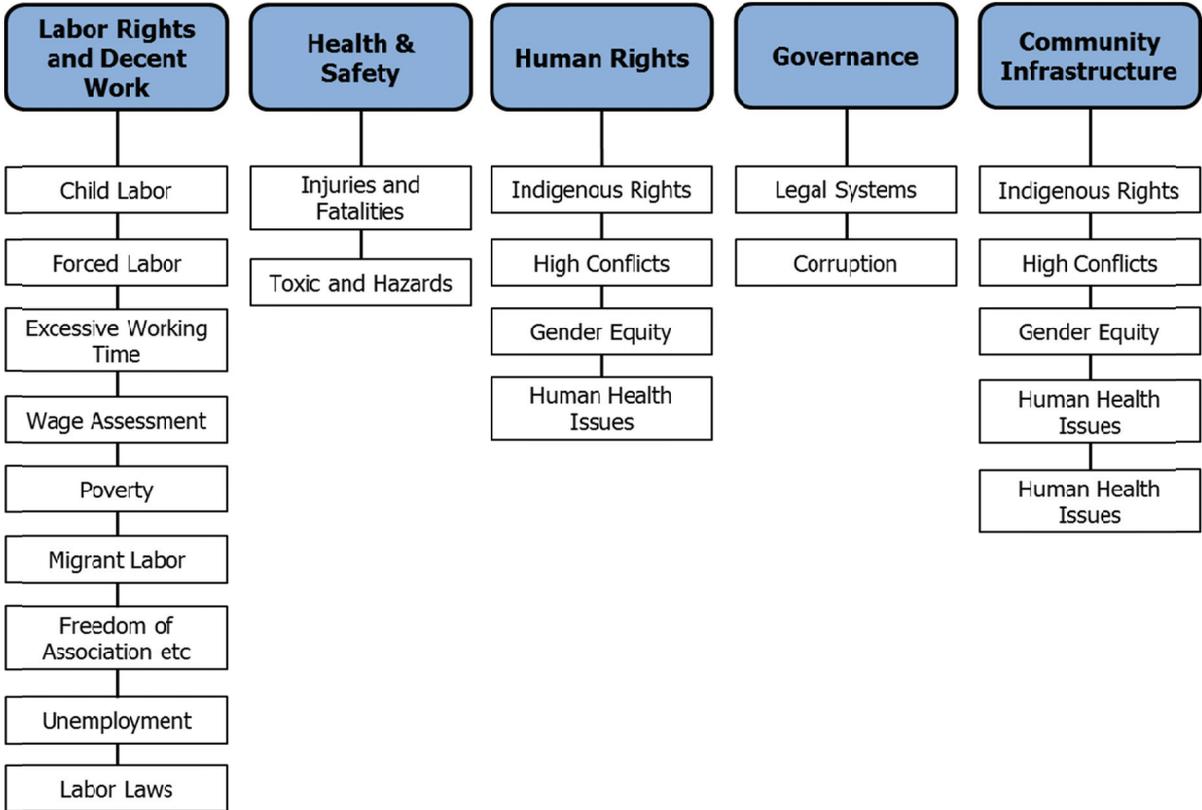


Abbildung 32: Social-Impact Kategorien und Nachhaltigkeitsindikatoren der social hotspots database (SHDB 2016)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass umfangreiche Datenbanken zur Verfügung stehen, die vom jeweiligen Anbieter an Softwaresysteme angebunden sind, die wiederum Analysemöglichkeiten, Ergebnisansichten und Wirkungsabschätzungen erlauben.

3.2.2.3 Product-Lifecycle Management Systeme

Die Anbieter von Product Lifecycle Management Systemen (PLM-Systeme oder auch Produktdatenmanagement-Systeme, PDM-Systeme) integrieren zunehmend Funktionen, die die Entwicklung nachhaltiger Produkte unterstützen sollen. Für die nachfolgende Betrachtung wurden folgende CAD- als auch PDM-Systeme hinsichtlich ihres Funktionsumfangs und methodischen Unterstützung untersucht, die im industriellen Umfeld weit verbreitet sind:

- CAD-Systeme:
 - SolidWorks von Dassault Systèmes
 - Inventor von Autodesk
- PDM-Systeme:
 - Windchill von PTC
 - Teamcenter von Siemens PLM
 - Enovia von Dassault Systèmes

Hierbei kann vorweg genommen werden, dass die Anbieter von CAD- und PDM-Systemen mit ähnlichen Funktionalitäten und Unterstützungsmöglichkeiten werben, um die Entwicklung nachhaltiger Produkte zu fördern. Die drei wichtigsten Aspekte zum Entwickeln nachhaltiger Produkte sind:

1. Compliance Management and Reporting

- Über Compliance Management soll erreicht werden, dass alle rechtlichen Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel REACH oder RoHS Verordnung eingehalten werden. Darüber hinaus sollen Informationen über die verwendeten Stoffe entlang der gesamten Supply-Chain verfügbar gemacht werden, damit beispielsweise Konfliktminerale schon bei der Entwicklung ausgeschlossen werden können. Einige Systeme unterstützen Unternehmen darin, Informationen für Nachhaltigkeit-Reports auszuleiten, indem sie so genannte Compliance Checks integriert haben.
- Beispiele für Compliance Management sind PTC Windchill Compliance, Enovia Materials Compliance Central und Teamcenter Sustainability and Environmental Compliance.

2. Informationsbereitstellung in der Supply-Chain

- Über die Bereitstellung von Material-, Prozess- und Lebenszyklusinformationen können Entscheidungen, die von Produktentwicklern getroffen werden, beschleunigt und verbessert werden. Eine umfangreiche Informationsbereitstellung ermöglicht dabei das Treffen von robusten Entscheidungen. Neben firmeninternen Informationen können auch externe Informationen, beispielsweise über zertifizierte Zulieferer und Nachweise über die Rohstoffherkunft bereitgestellt werden. Hierzu gehört u.a. auch die Anbindung der PDM/PLM Systeme an die IMDS Datenbank für die Automobilindustrie mit einem automatisierten Daten- und Informationsaustausch über IPC (Association Connecting Electronics Industries) Standards zu Materialdeklarationen von Zulieferern der Leiterplatten- und Elektronikindustrie.
- Beispiele für die Informationsbereitstellung sind PTC Windchill Supplier Management, PTC Windchill Materials and Substance und Teamcenter Zulieferer Management.

3. Lebenszyklusbewertungen

- Über die Integration von LCA-Funktionalität in CAD-Systeme und die Anbindung an entsprechende Datenbanken werden Produktentwickler/innen die Auswirkungen ihrer Entscheidungen auf ausgewählte Nachhaltigkeitsindikatoren (wie beispielsweise CO₂-Emissionen) direkt aufgezeigt. Über ein zugewiesenes Material wird aus der Volumeninformation des CAD-Modells eine Masse berechnet, die die Grundlage zur Bewertung bildet. Zusätzliche können Lebenszyklusinformationen, wie beispielsweise Transportweg und -art angegeben werden.
- Beispiele für die Lebenszyklusbewertungen sind das CAD-System Sustainability Xpress mit einer Anbindung an GaBi und an das PDM-System PTC Windchill LCA (Life Cycle Assessment).

Vor diesem Hintergrund lassen sich folgende Ansätze beurteilen:

- CAD- versus PDM-Systemansatz,
- Betrachtung verschiedener Stadien des Lebenszyklus,
- Berücksichtigung der ökonomischen Dimension,
- Berücksichtigung der ökologischen Dimension sowie
- Berücksichtigung von Compliance.

CAD- versus PDM-Systemansatz

Während SolidWorks Sustainability und Inventor Eco Material Adviser direkt in die CAD-Systemumgebung integriert sind, arbeitet Windchill nicht mit geometrischen Daten. Die Vorteile der Einbindung in CAD sind, dass Berechnungen und Simulationen für die verschiedenen Materialien durchgeführt werden können und die Auswirkungen von geometrischen Änderungen direkt sichtbar werden. Dagegen können im PDM-System Lebenszyklusprozesse in einem höheren Detaillierungsgrad analysiert werden. So kann beispielsweise die gesamte Lieferkette oder die Verwendung von Hilfsstoffen analysiert und bewertet werden.

Betrachtung verschiedener Stadien des Lebenszyklus

Alle Systeme betrachten mehrere Phasen des Produktlebenszyklus in unterschiedlich starker Ausprägung. Dabei ist es nur mit Windchill möglich, über unternehmensspezifische Anpassungen den Lebenszyklus detailliert abzubilden. Die Entwicklung wird in allen Systemen vernachlässigt. Lediglich in Windchill können durch die Anpassungen Lebenszykluskosten in die Berechnung einbezogen werden. Die Systeme konzentrieren sich vorrangig auf die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit.

Berücksichtigung der ökonomischen Dimension

Die ökonomische Dimension ist ebenfalls in allen Systemen enthalten, spielt allerdings im Eco Material Adviser und SolidWorks Sustainability eine untergeordnete Rolle. Hier werden ausschließlich die Materialkosten einbezogen. Über das Cost Modul von Windchill hingegen können sämtliche Lebenszykluskosten im System verwaltet werden. Allerdings sind die Kosten manuell zu berechnen, vom System gibt es hierfür keine weitere Unterstützung. Die eingepflegten Kosten der einzelnen Bauteile werden als Materialkosten zusammengefasst und die Kosten für Stücklisten zu den Montagekosten addiert.

Berücksichtigung der ökologischen Dimension

Die ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren sind für die verschiedenen Lebenszyklen in allen Systemen dieselben (z.B. CO₂-Emissionen und Global Warming Potential). Allerdings führen die Hersteller verschiedene Kennzahlen für die Bewertung ein. So wird beispielsweise der gesamte Energieverbrauch eines Bauteils für die einzelnen Lebenszyklusphasen zur Verfügung gestellt. Dieser Verbrauch hat dabei im System keine direkte Auswirkung auf die Umwelt. Erst eine genauere Betrachtung der Energiegewinnung lässt hier Rückschlüsse auf die Umweltverträglichkeit zu. Inventor betrachtet hierfür in der Nutzungsphase den Energiemix des jeweiligen Nutzungslandes.

Berücksichtigung von Compliance

In den CAD- und PDM-Systemen können Verordnungen und Richtlinien (z.B. REACH und RoHS) auf ihre Einhaltung hin überprüft werden. Hier werden neben ökologischen auch soziale Indikatoren einbezogen. Weitere spezifische Anpassungen an weltweite Branchen und Märkte sind laut Aussagen der Systemanbieter geplant. Inventor bietet beispielsweise eine Compliance-Auswertung für die Lebensmittelverträglichkeit an, bezieht sich dabei aber auf keine eindeutigen Verordnungen oder Richtlinien. Dagegen ist die RoHS-Richtlinie im Programm eindeutig definiert. Die Richtlinien und Verordnungen in Windchill sind ebenfalls an die gesetzlichen Bestimmungen angelehnt.

Es lässt sich festhalten, dass die Systeme unterschiedliche Unterstützungsmöglichkeiten zur Entwicklung nachhaltiger Produkte anbieten. Dabei variieren der Grad der Genauigkeit in der Modellierung und Analyse von Lebenszyklusinformationen. Es muss unternehmensspezifisch ausgewählt werden, welche Nachhaltigkeitsbeeinflussung und -beurteilung in welchem Umfang und Detaillierungsgrad erwünscht und notwendig ist.

Neben den etablierten Systemen existiert eine Vielzahl von Lösungen, die ebenfalls am Markt verfügbar sind und teilweise auf die Möglichkeiten der etablierten Lösungsanbieter aufbauen und deren Funktionsumfang erweitern. Meistens sind diese Lösungen allerdings in ihrer Reichweite der Unterstützung und im tatsächlichen Einsatz beschränkt und stellen Nischenprodukte dar. Hierzu zählt beispielsweise die Software von greendelta (Ciroth et al. 2013). Greendelta verfolgt dabei den Ansatz, PDM-Systeme und LCA-Systeme zu integrieren (Abbildung 33).

Greendelta entwickelt Lösungen, die einen Datentransfer der PLM-Lösung Enovia von Dassault Systèmes zu verschiedenen LCA-Werkzeugen¹² wie beispielsweise GaBi ermöglicht und somit eine Nachhaltigkeitsbewertung des aktuellen Konstruktionsstands erlaubt. Die zur Bewertung notwendigen Informationen werden auf Datenmodellebene miteinander verknüpft. So stammen Geometrieinformationen aus dem CAD-System Catia und Fertigungsinformationen aus dem CAM-System Delmia. Diese werden über ein Nutzerinterface mit den zusätzlichen Lebenszyklusinformationen über Logistik, Nutzung und End-of-Life Situation ergänzt. (Ciroth et al. 2013)

Aus der Analyse der bisherigen Lösungen ergeben sich folgende wesentliche Limitationen der verschiedenen Systemansätze:

¹²Gängige Werkzeuge zur LCA sind beispielsweise GaBi (www.gabi-software.com), SimaPro (www.pre-sustainability.com/SimaPro), openLCA (www.openlca.org) und Eime (www.bureauveritas.de).

- Reduktion des Produktmodells auf Masse: Die (technischen) Eigenschaften des Produktes werden vernachlässigt.
- Keine Auflösung von Baugruppen: Baugruppen mit unterschiedlichen Teilen erfordern aber z.B. unterschiedliche Prozesse in der Fertigung.
- Vereinfachte Bewertungskriterien: Die Aussagekraft der Bewertung ist gering und es können die falschen Schlüsse zur Produktverbesserung gezogen werden.

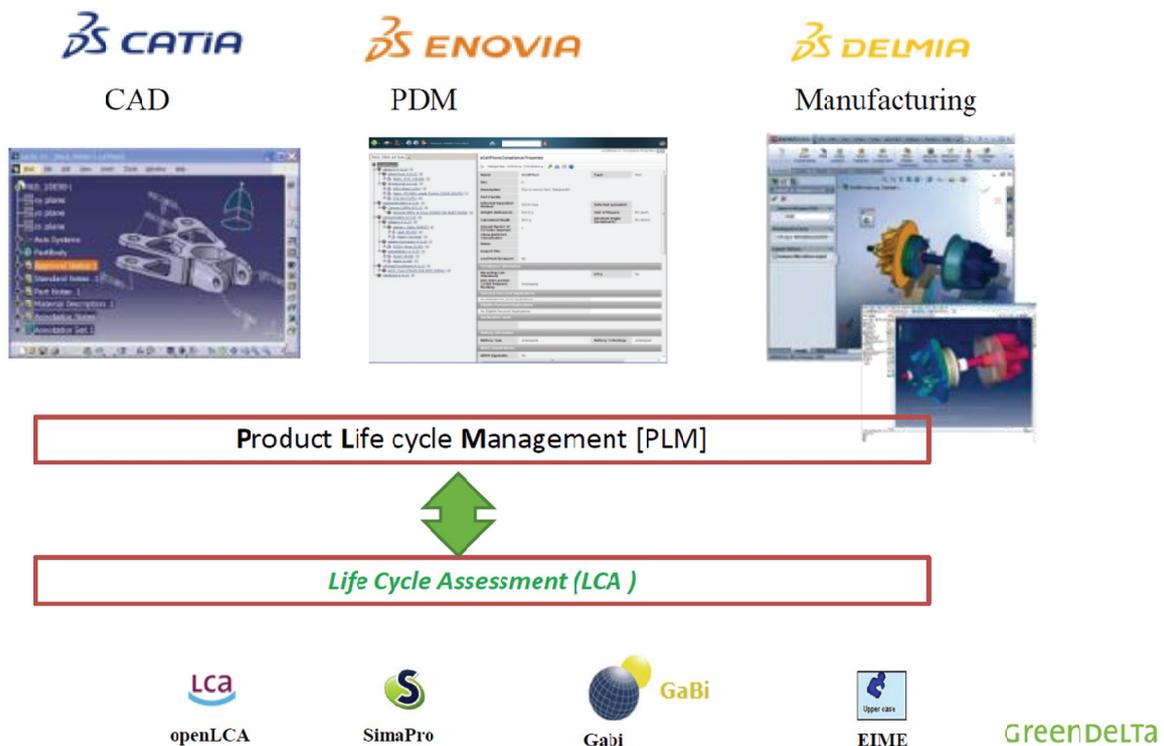


Abbildung 33: Integration von PDM/PLM und LCA der Firma greendelta (Ciroth at al. 2013)

3.2.2.4 Produktmodelle

Ein zentrales Problemfeld liegt in der Organisation und (informationstechnischen) Verwaltung von Nachhaltigkeitsinformationen. Dies ist hauptsächlich darin begründet, dass über den gesamten Lebenszyklus verschiedene Softwaresysteme mit unterschiedlichen Datenstrukturen über verschiedene Interessenten/Stakeholder eingesetzt werden und somit ein durchgängiger Produktdatentransfer nur schwer möglich ist. Mit nationalen und internationalen Normungsaktivitäten wird versucht, eine Lösung auf Produktmodellebene für den durchgängigen und verlustfreien Informationsfluss zu schaffen. Unter dem Begriff des „Integrierten Produktmodells“ wird dabei die Möglichkeit verstanden, sämtliche Produktinformationen über alle Produktlebensphasen formal abzubilden. Dem Ansatz liegen die folgenden Annahmen zu Grunde (nach Wartzack 2001, S40f.):

1. Produktinformationen aus allen Phasen des Produktlebenszyklus werden abgebildet.
2. Verschiedene physikalische Produkteigenschaften werden in einem Modell vereinigt.
3. Verschiedene Sichtweisen der Anwendungsgebiete werden berücksichtigt.

Zu den populärsten Abbildungen zählen die Formate STEP (STandard for the Exchange of Product model data) und JT (Jupiter Tessellation). Beide erheben den Anspruch eines integrierten Produktmodells. In der STEP ISO 10303 wird der Produktmodellbegriff über verschiedene Partialmodelle definiert, die unterschiedliche Anwendungsgebiete (z.B. Elektrik/Elektronik, Maschinen-/Anlagenbau) und alle Phasen des Produktlebenszyklus abbilden.

Im PLM-Umfeld hat sich eine weitere Definition des Produktmodells aufgetan. Gängige PDM-Systeme besitzen eine entkoppelte Produkt- und Dokumentenverwaltung (Abbildung 34). So kann unter anderem sichergestellt werden, dass Bauteilmodelle mehrmals im selben oder in anderen Produkten (z.B. Baureihen) verwendet werden können, ohne dass Daten redundant gehalten werden müssen. Vor dem Hintergrund dieser Logik bestehen Produktmodelle im PLM-Verständnis also aus den Komponenten Produktstammsatz, Produktstruktur, Dokumente und Dokumentenstrukturen. Ein Stammsatz enthält alle Daten, die auch ohne Beziehung zu anderen Daten aussagefähig für Produktentwicklungen sind. Dazu zählen beispielsweise Identifikationsdaten (z.B. Sachnummern, Zeichnungsnummern), Ordnungsdaten (z.B. Teileart, Statusdaten) und Konstruktionsdaten (Gewicht, Werkstoff). Strukturdaten stellen dagegen Beziehungen zwischen den Stammdaten her (z.B. Bauteil A gehört zu Baugruppe B, Werkstoff A besteht aus Material B). (Eigner und Stelzer 2009, S. 28ff.)

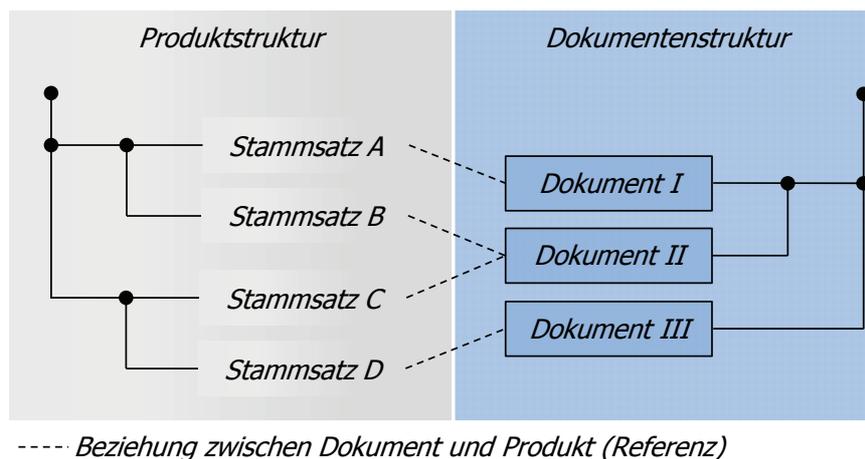


Abbildung 34: Zusammenhang zwischen Produkt- und Dokumentenstruktur

3.2.2.5 Informationsqualität

Eine Herausforderung für die Entwicklung von nachhaltigen Produkten ist der Umfang und die Qualität der Lebenszyklusinformationen, die in der Produktentwicklung zur Verfügung stehen. Hier wird in der Entwicklung vorrangig auf Annahmen über das Lebenszyklusverhal-

ten und Wünschen sowie Anforderungen an das Produkt gearbeitet. Eine konkrete Aussage, ob das Produkt letztendlich nachhaltig im Sinne der gedachten und geplanten Wünsche ist, lässt sich erst am Lebensende feststellen. In der Entwicklung muss daher unter Informationsunschärfe gearbeitet werden. Es werden bei sämtlichen Entscheidungen in der Produktentwicklung Annahmen getroffen, die sich später bewahrheiten müssen. Jede Annahme beruht dabei auf potentiellen Lebenszyklusinformationen, zum Beispiel aus Daten, die aus verschiedenen Material- und Prozessdatenbanken entnommen werden können (vgl. Kapitel 3.2.2.1). Diese Daten stimmen jedoch nur für eine bestimmte Anzahl von Fällen überein. Hilfreich ist hier der Begriff der Informationsqualität, der in Anlehnung an die Qualitätsdefinition der DIN EN ISO 9000 ff. (Qualitätsmanagementsysteme) allgemein definiert werden kann als „Grad, in dem [...] Merkmale eines Datenproduktes Anforderungen genügen.“ (Rohweder et al. 2011, S. 25). In dieser Theorie gibt es darüber hinaus die 15 IQ (Informationsqualität) Dimensionen, die sich in vier Kategorien systemunterstützt, inhärent, zweckabhängig und darstellungsbezogen einteilen lassen, wie Abbildung 35 zeigt.

Die 15 Dimensionen beschreiben, welche Eigenschaften Nachhaltigkeitsinformationen besitzen müssen, um eine hohe Qualität für die Nachhaltigkeitsbeeinflussung und -beurteilung aufzuweisen.

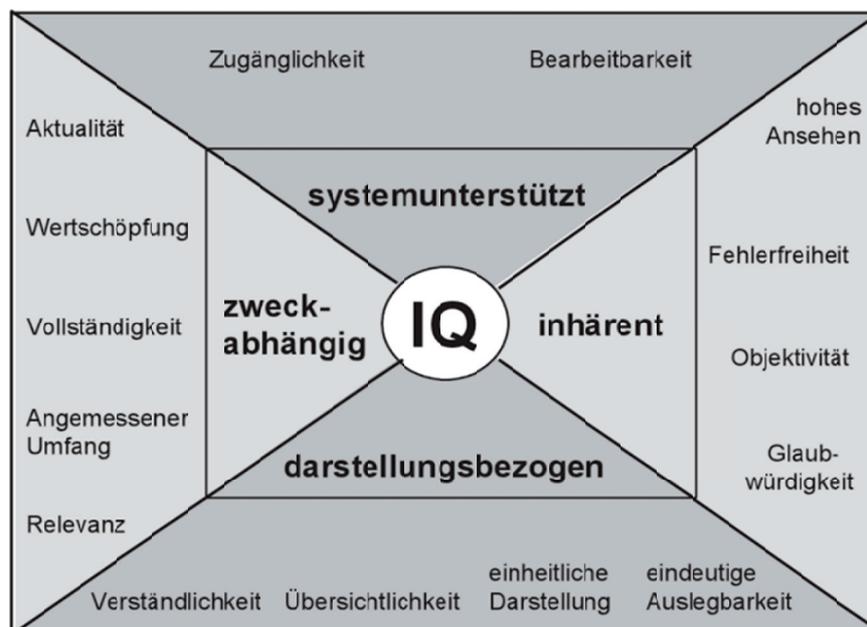


Abbildung 35: Die 15 Informationsqualität-Dimensionen (nach Rohweder et al. 2011, S. 29)

3.2.2.6 Lifecycle Management und Modelling

Nach Eigner wird erwartet, dass PLM-Systeme in den nächsten Jahren weitere Funktionen für die Einbindung von Produktlebenszyklus- und Supply-Chain-Informationen sowie neue Disziplinen integrieren und bereitstellen müssen. Der neue Ansatz besteht im Systems Lifecycle

Management (SysLM) und integriert produkt- bzw. systembezogene Anforderungen, Funktionen, Verhalten und die logische Komponentenstruktur. Dabei besteht das primäre Ziel nicht nur im Datenmanagement sondern im ganzheitlichen Management der Prozesse und der Organisation sowohl in den frühen Phasen der Entwicklung als auch in der Nutzungs- bzw. Betriebsphase. Darüber soll sichergestellt werden, dass Felddaten an die Produktentwicklung zurückgespiegelt werden, die in einem gemeinsamen Produkt- und Prozessmodell genutzt werden können. Abbildung 36 zeigt den gesamten Umfang, der vom SysLM Ansatz unterstützt werden muss. Dazu zählt die Integration verschiedener Disziplinen der Produktentwicklung (z.B. Mechanik, Software, Dienstleistung) mit den Anforderungen und Informationen aus dem Produktlebenszyklus (z.B. Simulationsergebnisse, Betriebsdaten und Nachnutzungsinformationen) und der gesamten Lieferkette (Supply-Chain über OEM, Tier 1 bis Tier n). (Eigner 2014, S. 281)

Ferner beschreibt Eigner, dass SysLM neben einer reinen Administrationsunterstützung der klassischen PDM-Funktionen, wie beispielsweise Produktstruktur- und Freigabemanagement, die Produktplanung und Entscheidungsfindung sowie das Innovationsmanagement unterstützen muss. Dazu zählt die Integration von Funktionen zur Ökobilanzierung, zum Compliance-Management genauso, wie die Einbindung von Big Data und sozialen Netzwerken. (Eigner 2014, S. 284f.)

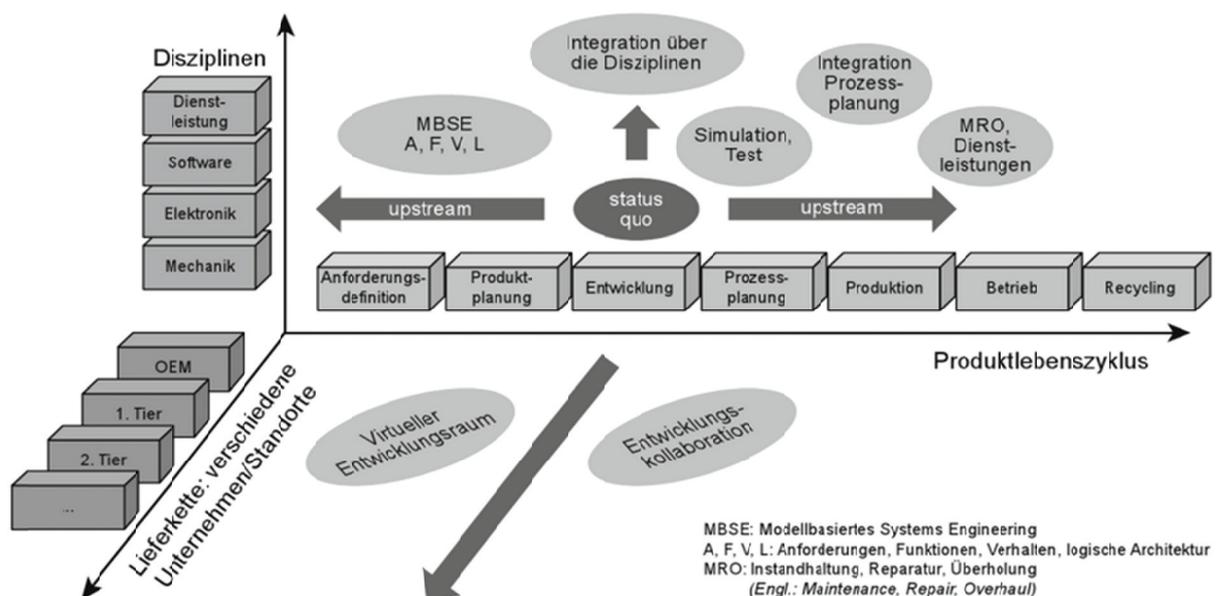


Abbildung 36: Integration von Produktlebenszyklus, Disziplinen und Lieferkette (Supply-Chain) als Ausgangslage für Systems Lifecycle Management (SysLM) (Eigner 2014, S. 281)

Nach Sandler fehlen zur Umsetzung von SysLM derzeit Ansätze, die vielen existierenden Modelle effektiv miteinander zu verknüpfen, die Informationen in passender Granularität in ein gemeinsames Datenmodell für Entwicklung und Produktion zu integrieren und Modelle so zu

definieren, dass sie eine realistische Funktionssimulation von Produkt und Fertigung gestatten. Darüber hinaus müssen Modelle erzeugt werden, die eine durchgängige Nutzung der Daten über den gesamten Lebenszyklus von Produkt und Produktionssystem erlauben. (Sendler 2013, S. 13ff.)

Neben der weit verbreiteten Unified Modelling Language (UML) für die Modellierung von Softwaresystemen bietet die Lifecycle Modeling Language (LML) einen Lösungsansatz zur Unterstützung von SysLM. Eine umfassende Dokumentation von UML ist u.a. in der Norm ISO/IEC 19505^{13, 14} verfügbar. Im Folgenden wird auf die produktlebenszyklusorientierte Sprache LML eingegangen (siehe Abbildung 37).

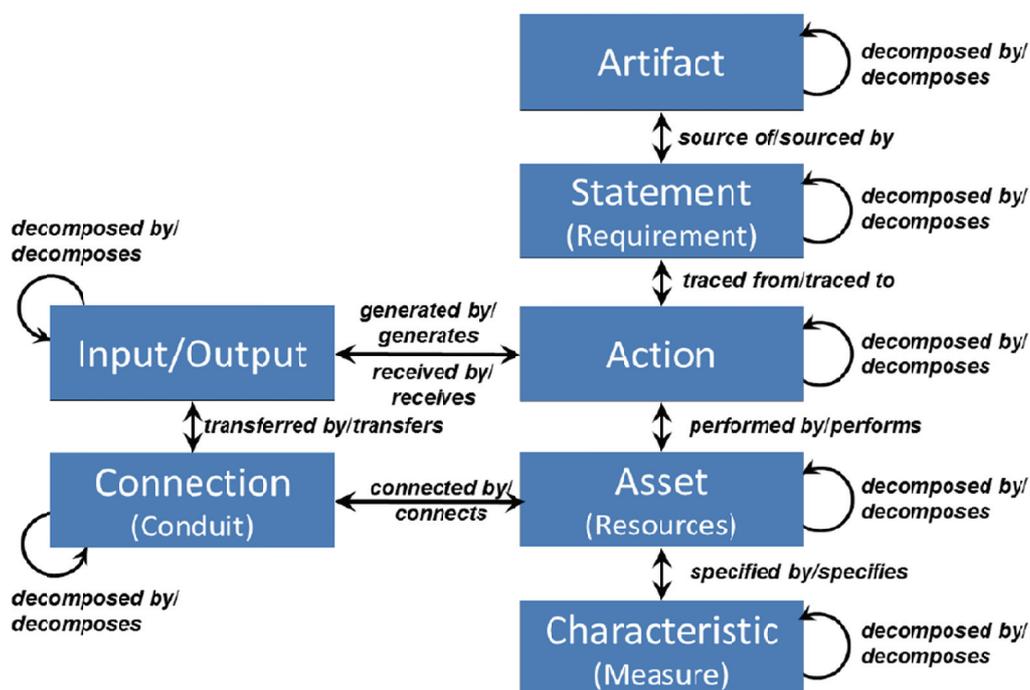


Abbildung 37: Lifecycle Modelling Language (LML) Aufbau im Überblick (LML 2016)

Systems Engineering Ansätze, Methoden und Werkzeuge haben sich in den letzten Jahren weiterentwickelt. Dazu zählen u.a. Model Based Systems Engineering (MBSE) und SysML. Allerdings ist bei diesen Ansätzen die Lebenszyklusperspektive nicht sehr stark ausgeprägt. Dies erfordert neue Ansätze zur Analyse, Planung, Spezifizierung, Aufbau und Pflege von modernen Systemen, die durch LML aufgegriffen werden. LML nimmt die Grundsätze aus MBSE über eine Systementwicklung auf und erweitert sie um lebenszyklusorientierte Aspekte. Über eine Ontologie werden die komplexen Zusammenhänge zwischen Produkt- bzw. Systemmodelle und Lebenszyklusmodelle abgebildet. Die Grundlage für die LML ist das klas-

¹³ ISO/IEC 19505-1:2012: „Information technology - Object Management Group Unified Modeling Language (OMG UML) -- Part 1: Infrastructure“

¹⁴ ISO/IEC 19505-2:2012: „Information technology - Object Management Group Unified Modeling Language (OMG UML) -- Part 2: Superstructure“

sische ERA-Modell, bestehend aus Entität, Beziehung und Attribut (ERA, Entity, Relationship, Attribute). (LML 2016)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass LML eine geeignete Grundlage zur Modellierung von Produktsystemen und Lebenszyklusabläufen ist. Sie fokussiert die Entscheidungsfindung und dabei primär auf „Actions“ und „Assets“. Dabei wird sie als eine allgemeine Ontologie verstanden, die nicht auf technische Produktmerkmale und -eigenschaften heruntergeht. Diese werden lediglich als „Characteristics“ modelliert. Dafür können mit der LML Simulationen durchgeführt werden (z.B. können Werte für „capacity“ vorgesehen werden und wenn diese überschritten werden, erhöht sich der Wert für „latency“). Automatisches Reasoning ist mit LML nicht möglich. Die Limitationen von LML liegen hauptsächlich im Bekanntheitsgrad und in der praxistauglichen Anwendung. Es müssen alle folgenden Elemente in einer Ontologie abgebildet und die Beziehungen zueinander beschrieben werden. In der Praxis ist der Aufwand zu hoch, das Setzen der Systemgrenzen und Beziehungen ist auch eine praktische Herausforderung. Außerdem muss das gesamte Modell entworfen und durchdacht werden, was an sich eine Herausforderung für produzierende Unternehmen darstellt, weil es unternehmensübergreifend modelliert werden muss. Darüber hinaus können Änderungen in den Entities und Beziehungen, wie sie in der Praxis häufig passieren, nur mit großem Aufwand eingearbeitet werden.

4 Forschungsbedarf

Aus dem theoretischen Rahmenkonzept (Kapitel 2) und dem Stand der Technik (Kapitel 3) wurde der Forschungsbedarf zur Entwicklung nachhaltiger Produkte abgeleitet und in wissenschaftlichen Community einer Validierung unterzogen. In Kapitel 4.1 werden zunächst die für die weitere Erforschung des Themas gezogenen Schlussfolgerungen dargelegt; Kapitel 4.2 zeigt die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Validierung auf.

4.1 Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik

Das Lebenszyklusdenken in Unternehmen leistet einen wesentlichen Beitrag zur Umsetzung des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung. Der Fokus der Unternehmen liegt in der Regel auf den rein wertschöpfenden Prozessen an Produktionsstandorten. Allerdings zeigen sich die Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft nicht nur dort, sondern lassen sich über den gesamten Lebensweg des Produktes erkennen. Im Zuge einer steigenden Verantwortung der Unternehmen für ihre Produkte sehen sich Unternehmen deshalb zunehmend verpflichtet, wirtschaftliche, ökologische und soziale Aspekte über den Produktlebenszyklus hinweg in ihre wertschöpfenden Prozesse zu integrieren. Da sich derzeit ein wachsendes Käuferinteresse an nachhaltigen Produkten und Dienstleistungen erkennen lässt, kann dieses Handeln Unternehmen sogar ein Wettbewerbsvorteil bieten und so dazu beitragen, den Unternehmenserfolg langfristig zu sichern.

Entschließt sich ein Unternehmen dazu, den gesamten Produktlebenszyklus in seine Prozesse zu integrieren, nimmt der Bereich der Produktentwicklung eine zentrale Rolle bei der Umsetzung ein, da die Entwicklung am Anfang des Produktlebens steht und die nachgelagerten Phasen über das Produkt mit seinen Merkmalen und Eigenschaften weitgehend vordefiniert.

Spur und Krause sehen die Produktentwicklung in diesem Zusammenhang als Teil eines Produktionssystems an, das sich auf das soziökonomische, soziotechnische und natürliche Um- system auswirkt (vgl. Spur und Krause 1997, S. 37); Ueda et al. definieren an wertschöpfende Produktionssysteme nachhaltige Kriterien (Ueda et al. 2009).

Wird die Produktentwicklung als Teil der Wertschöpfung betrachtet, ergeben sich unter Einbindung der Verantwortung von Unternehmen für die Lebenszyklen ihrer Produkte nachhaltige Entwicklungsziele (vgl. Kapitel 2.5). Zu diesen Zielen zählen neben den klassischen Entwicklungszielen Zeit, Kosten und Qualität auch soziale und ökologische Nachhaltigkeit.

Im Rahmen dieser Arbeit wird dazu vorrangig die operative Unternehmensebene betrachtet. Wie in Kapitel 2.5 bereits dargestellt wurde, besteht hier das größte Forschungspotential. Den Zusammenhang zwischen den Unternehmensebenen und den Ebenen der operativen Produktentwicklung zeigt Abbildung 38.



Abbildung 38: Zusammenhang zwischen Unternehmensebenen und Ebenen der Produktentwicklung (orange Einfärbung)

Die Entwicklungsziele müssen im Produkt synthetisiert werden. Dazu ist es notwendig, bei der Entwicklung nachhaltiger Produkte die folgenden Ebenen zu betrachten:

- I. Prozess und Organisation,
- II. Entwicklungsaktivitäten und -methoden,
- III. Informationstechnologien und Werkzeuge sowie
- IV. Informationsartefakte und -standards.

Der Stand der Technik zeigt für alle Ebenen auf, dass partielle Lösungen existieren. Dies gilt für Lebenszyklusdenken und Produktentstehungsprozess (I und II, Kapitel 3.1) genauso wie für die Wissensverarbeitung und Informationstechnologien (III und IV, Kapitel 3.2).

Bezüglich der Ebenen I und II lässt sich festhalten, dass das Feld der Methoden und Vorgehensweisen für die strategische Ebene in der Wissenschaft sehr stark ausgeprägt ist. Schon 2002 mahnten Baumann et al. an, dass zwar eine Vielzahl von Methoden existiere, Forscher aber dazu tendieren würden, eigene Werkzeuge zu konzipieren statt die bestehenden zu analysieren, zu verbessern und letztendlich für die Praxis anwendungstauglich zu gestalten

(Baumann et al. 2002). So fokussieren die Ansätze von Sustainable Product Development und Environmental Management Systems beispielsweise stark auf die normative und strategische Ebene und lassen die operative weitgehend unberücksichtigt. Die Lösungen, die aus den Ansätzen Design for Environment und Life Cycle Assessment hervorgehen, sind dagegen in der strategischen und operativen Unterstützung stark, auf der normativen Ebene jedoch relativ schwach ausgeprägt (vgl. Kapitel 3.1). Die Ansätze der Wissensverarbeitung und der Informationstechnologie wiederum gehen sehr auf die Ebenen III und IV ein. Dabei wird Software als Unterstützung für existierende Methoden und Vorgehensweisen genutzt, mit der Folge, dass die Software zugleich einen Einfluss auf die Wahl bzw. Definition ausübt (vgl. Kapitel 3.2).

Für den Forschungsbedarf lassen sich aus dem Stand der Technik schließlich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Nachhaltige Produktentwicklung wird oftmals als ein neuer Ansatz verstanden und nicht in bestehende Vorgehensweisen von Unternehmen integriert.
- Unternehmen können das Risiko eines Einsatzes theoretisch entwickelter Methoden ohne vorherige Validierung aus ökonomischen Gründen nicht eingehen.
- Lösungsansätze des Lebenszyklusdenkens sind bisher noch unzureichend in Wissens- und Informationstechnologien zum Lebenszyklusmanagement integriert.
- Die Entwicklung nachhaltiger Produkte erfordert eine umfassende informationstechnische Unterstützung.

Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht ergibt sich daraus die Forderung, die Vorgehensweise bei der Entwicklung von Produkten den nachhaltigen Werten anzupassen, ohne bestehende Geschäftspraktiken grundlegend zu verändern. In den Entwicklungsprozess sind Nachhaltigkeitsforderungen durchgängig zu integrieren sowie Zielsetzung und Zielerreichung adäquat an alle Stakeholder zu kommunizieren.

4.2 Validierung durch die wissenschaftliche Community

Die aus dem Stand der Technik gezogenen Schlussfolgerungen (Kapitel 4.1) wurden im Rahmen eines internationalen Workshops mithilfe europäischer Wissenschaftler/innen verschiedener Disziplinen validiert. Der Workshop führte den Titel „Decision support for the design of sustainable products“, er wurde auf der IEEE ICE Konferenz (International Conference on Engineering, Innovation and Technology) 2014 in Bergamo, Italien durchgeführt. Über eine Dauer von 180 Minuten diskutierten 17 Personen aus wissenschaftlichen europäischen Einrichtungen - 11 Personen vertraten universitäre Einrichtungen, 6 kamen aus Ein-

richtungen der angewandten Forschung – zum Thema „Anforderungen an Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung aus Sicht der verschiedenen Stakeholder entlang des Produktlebenszyklus“ diskutiert.

Die Diskussion sollte deutlich machen, wie die europäischen Wissenschaftler/innen den Einfluss der Entwicklungsphase auf die Nachhaltigkeit eines Produktes begreifen. Dazu wurden zunächst die ökologischen, ökonomischen und sozialen Herausforderungen entlang des Produktlebenszyklus aufgenommen. Die auf diese Weise identifizierten Herausforderungen der Produktentwicklung wurden im Anschluss den unterschiedlichen Lebensphasen zugeordnet und abschließend in Bezug auf die aus ihnen resultierenden Abhängigkeiten zu den Entwicklungstätigkeiten diskutiert.

Das zentrale Ergebnis des Workshops bildet eine Kaskade von Auswirkungen der Entwicklung auf die Nachhaltigkeit eines Produktes, die sich wie folgt beschreiben lässt. Ausgehend von Produktmerkmalen, die in der Entwicklung festgelegt werden (z.B. Produktarchitektur, Produktgeometrie, Materialauswahl), werden die Produkteigenschaften bestimmt (z.B. Gewicht, Funktionalität, Umweltverträglichkeit). Diese Produkteigenschaften wiederum haben Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit des Produktes (z.B. Lebensdauer, Global Warming Potential, Kundenzufriedenheit). Hierbei gilt es zu beachten, dass die Produkteigenschaften nur wirksam werden, wenn das Produkt in den Kontext seiner Lebensphasen gesetzt wird, d.h. wenn das Produkt hergestellt, genutzt und eine Behandlung am Lebensende erfährt. In Abbildung 39 ist das Ergebnis des Workshops zusammenfassend dargestellt.

Die Zusammenhänge zwischen den Produktmerkmalen und -eigenschaften einerseits und den unterschiedlichen Lebensphasen andererseits wurden in der Gruppe kontrovers diskutiert. Hier lässt sich als Ergebnis die Aussage formulieren, dass Produkte im Einzelfall betrachtet werden müssen, also keine generellen Aussagen getroffen werden können (z.B. modulare Bauweise hat ein geringeres Global Warming Potential als Integralbauweise).

Wissenschaftler/innen forderten, dass Lebenszyklusdenken als eine unternehmerische Aufgabe – auch und insbesondere durch die Unternehmen selbst – wahrgenommen werden soll: Unternehmen sollten Verantwortung für den gesamten Lebenszyklus eines Produktes übernehmen. In diesem Zusammenhang benannten die Wissenschaftler jedoch zugleich auch eine wesentliche, letztlich nur bedingt lösbare Herausforderung für Unternehmen: die unterschiedliche Interessen verschiedener Stakeholder und, damit verbunden, die an sie herangetragene Diversität an Nachhaltigkeitszielen.

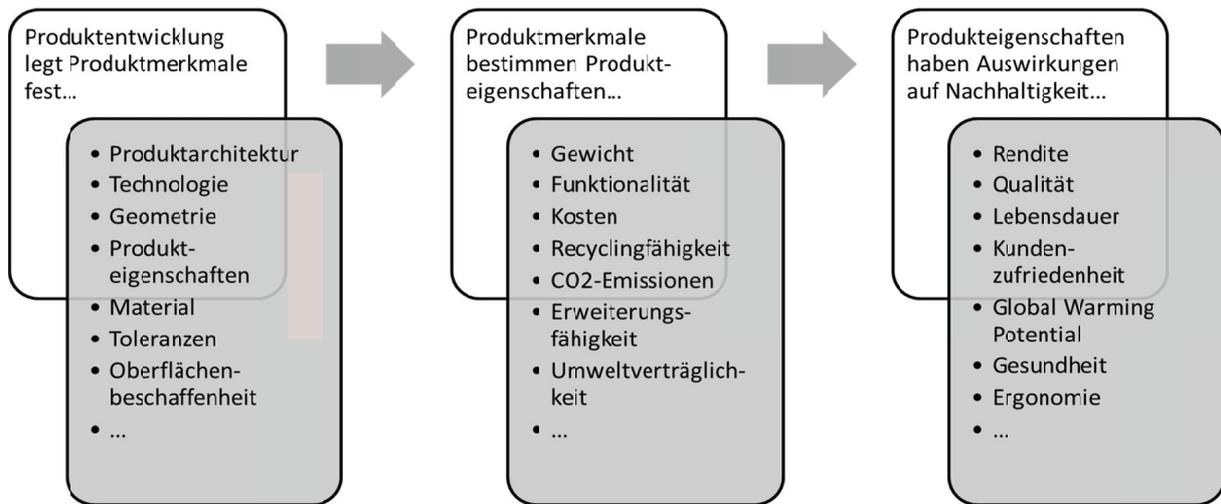


Abbildung 39: Kaskade der Auswirkungen von der Produktentwicklung auf die Nachhaltigkeit

Eine weitere Herausforderung sahen die Wissenschaftler/innen darin, den Produktlebensweg auf einer „globalen“ Ebene zu durchdenken und entsprechende Handlungen für die Produktentwicklung abzuleiten. Die informationstechnische Unterstützung von Entwicklungsaktivitäten wurde im Workshop nur am Rande erwähnt. Zwar waren den Wissenschaftler/innen die existierenden Methoden, Werkzeuge und Vorgehensweise (s. Kapitel 3.1.2) bekannt, diese ließen sich ihrer Aussage nach, in der Praxis jedoch nur bedingt einsetzen, weil das Vorausschauende auf den Lebenszyklus meistens fehlte und eine retrospektive Bewertung des Erreichten zugleich nur einen Einfluss auf nachfolgende Produktentwicklungen haben kann. Eine konkrete und informationstechnische Unterstützung bei der Produktentwicklung, die planend und vorausschauend Zusammenhänge zwischen ökonomischen und ökologischen Aspekten aufzeigt und zugleich effizient und effektiv, robust, belastbar und anwendungsfreundlich sowie modular aufgebaut ist, wurde von den Wissenschaftler/innen entsprechend als ein Desiderat in der Forschungslandschaft beschrieben.

Abschließend lässt sich festhalten: Die Wissenschaftler/innen bestätigten den aus der Literaturanalyse erfassten Stand der Technik und stimmten den daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen für eine wissensbasierte Entwicklung nachhaltiger Produkte zu. Somit kann der im Rahmen dieser Arbeit formulierte Forschungsbedarf als valide und die daraus formulierten Forschungsfragen (s. auch Kapitel 1.2) als berechtigt angesehen werden. Forschungsbedarf und Forschungsfragen können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Prozess und Organisation: Wie müssen Nachhaltigkeitsforderungen im Unternehmen kommuniziert werden und wie werden diese an Verantwortliche in der Produktentwicklung herangetragen?

2. Entwicklungsaktivitäten und -methoden: Welche Aktivitäten werden durchgeführt und welche Methoden benötigen Entwicklungsingenieure, um nachhaltige Entscheidungen treffen zu können?
3. Informationstechnologien und Werkzeuge: Welche Informationstechnologien und Werkzeuge können in welchem Zusammenhang die Produktentwicklung unterstützen?
4. Informationsartefakte und -standards: Welche Informationsartefakte und -standards müssen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte erstellt werden und wie können (Nachhaltigkeits-) Informationen sinnvoll vernetzt werden?

Bei der Betrachtung dieser vier Ebenen wird deutlich, dass integrierte Lösungen entwickelt werden müssen. Prozess und Organisation, Entwicklungsaktivitäten und -methoden, Informationstechnologien und Werkzeuge sowie Informationsartefakte und -standards stellen einen zusammenhängenden Kontext dar, für den zwar Partiallösungen teilweise existieren. Eine Integration der einzelnen Lösungen würde aber den wesentlichen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Produkte leisten.

5 Studie zum Lebenszyklusdenken und -handeln in der industriellen Praxis

Inwieweit es einer durchgängigen Implementierung und Realisierung von Nachhaltigkeit aus industrieller Sicht bedarf, wurde im Rahmen dieser Arbeit in der Mobilitätsbranche empirisch untersucht. Im Zentrum stand die Frage, welche Hürden bei der innerbetrieblichen Implementierung und Realisierung von Nachhaltigkeit bestehen. Die Ergebnisse aus der Erhebung dienen dazu, die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse zu validieren und zugleich zu erweitern. Die Studie wird im Folgenden vorgestellt. Kapitel 5.1 präzisiert die Fragestellung der Erhebung; in Kapitel 5.2 wird die Stichprobe nachhaltig agierender Unternehmen aus der Mobilitätsbranche einschließlich des Auswahlprozesses, dargelegt; Kapitel 5.3 beschreibt die empirische Erhebung; Kapitel 5.4 eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse.

5.1 Fragestellung

Der aus dem Stand der Technik abgeleitete Forschungsbedarf (Kapitel 4) zeigt, dass auf allen Ebenen (normativ, strategisch und operativ) theoretische Lösungen existieren, auf deren Grundlage eine durchgängige Implementierung des Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung in Produktentwicklungsprojekte theoretisch möglich ist. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie produzierende Unternehmen tatsächlich bei der Implementierung und Realisierung vorgehen. Im Rahmen der Studie zum Lebenszyklusdenken und -handeln in der industriellen Praxis wurde entsprechend untersucht, wie Unternehmen Nachhaltigkeitsforderungen innerbetrieblich umsetzen, das heißt Nachhaltigkeitsforderungen bei der operativen Planung, Durchführung, Steuerung und Kontrolle von Entwicklungsprojekten berücksichtigen.

5.2 Stichprobe

5.2.1 Begründung und Vorstellung der Branche

Wie in Kapitel 2 dargelegt, wird das Verständnis einer nachhaltigen Entwicklung maßgeblich durch den Brundtland-Report geprägt. Darin wird der Gleichgewichtszustand beschrieben, den es zu erreichen gilt: Die heutige Generation muss so leben, dass die Möglichkeiten künf-

tiger Generationen nicht gefährdet bzw. eingeschränkt werden, ihre Bedürfnisse zu erfüllen (WCED 1987).

In vielen Unternehmen wurde einerseits die Notwendigkeit erkannt, einen Beitrag zu einer derartigen Lebensweise zu leisten (vgl. Schaltegger und Hansen 2013, S. 20f.). Andererseits wurden Unternehmen von der Legislative in die entsprechende Richtung gelenkt. Geeignete Anwendungsbeispiele für das Lebenszyklusdenken und -handeln lassen sich insbesondere im Bereich der Mobilität finden. Aus diesem Grund wurde die Mobilitätsbranche als Stichprobe für die Studie bestimmt.

Beispiele aus der Mobilitätsbranche wie die des Nissan Leaf und des Chevrolet Volt zeigen auf, dass sich nicht ausschließlich auf das Käuferverhalten hinsichtlich einer nachhaltigen Entwicklung verlassen werden kann. So entwickelte beispielsweise die Firma Chevrolet das Hybridfahrzeug¹⁵ Volt (Abbildung 40) nach ökologisch-nachhaltigen Kundenwünschen (z.B. geringer CO₂ Ausstoß bei hoher Reichweite und hohem Fahrkomfort (Teichmann et al. 2012, S. 30)). Sie berücksichtigte dabei die Ergebnisse einer soziökonomischen Studie vom DIN Deutsches Institut für Normung e.V. für die Elektromobilität im Individualverkehr, die sechs kritische Faktoren für die Kundenakzeptanz aufzeigt (Teichmann et al. 2012, S. 143). Dazu zählen Kosten, Komfort, Reichweite, Umwelt, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Ladeinfrastruktur. Obwohl beim Chevrolet Volt alle Faktoren in der Entwicklung einbezogen wurden, blieben die Absatzzahlen hinter den Planungen zurück. Grund dafür ist der Preis des Fahrzeugs. So lag der Einstiegspreis für Chevrolet Volt fast doppelt so hoch wie zum vergleichbaren Fahrzeug Chevrolet Cruz mit konventionellem Verbrennungsantrieb. Entsprechend gestaltete sich auch das Verhältnis der Absatzzahlen; dies lag bei 1 (Chevrolet Volt) zu 30 (Chevrolet Cruz) (Welsh 2012). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die preisliche Diskrepanz zum ökologisch freundlichen Image ein Kaufhemmnis sein kann. An dieser Stelle wird der Halo-Effekt (vgl. Auger und Devinney 2007) zwischen der Absicht zum Kauf und dem tatsächlichen Handeln der Käufer deutlich.

Das Beispiel des Chevrolet Volts zeigt auf, in welchem Spannungsfeld, zwischen den Bedürfnissen und Erwartungen der Gesellschaft an die Mobilität einerseits und der Entwicklung von nachhaltigen Mobilitätslösungen andererseits, sich die Unternehmen der Mobilitätsbranche befinden. Aus Sicht der Unternehmen ist die Suffizienz-Strategie, also der Verzicht der Ge-

¹⁵ PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle): Neben der Aufladung am herkömmlichen Stromnetz steht im Fahrzeug ein Verbrennungsmotor bereit, der zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Der Verbrauch bei reinem Elektroantrieb entspricht einem Benzinäquivalent von 2,53 l/100 km bei vollständig geladener Batterie auf den ersten 56,3 km. Im kombinierten Betrieb erreicht der Volt eine Reichweite von 900 km bei einem benzinäquivalenten Verbrauch von 3,92 l/100 km. (Teichmann et al. 2012, S. 143ff.)

sellschaft auf Mobilitätslösungen, nicht tragbar, weil sie das Fortbestehen der Unternehmen gefährdet. Deshalb kommt nur die Effizienz-Strategie in Frage: Mobilitätslösungen müssen über nachhaltige Innovationen hinsichtlich der negativen sozialen und Umwelt-Auswirkungen verbessert werden. (Kölpin 2013, S. 261)

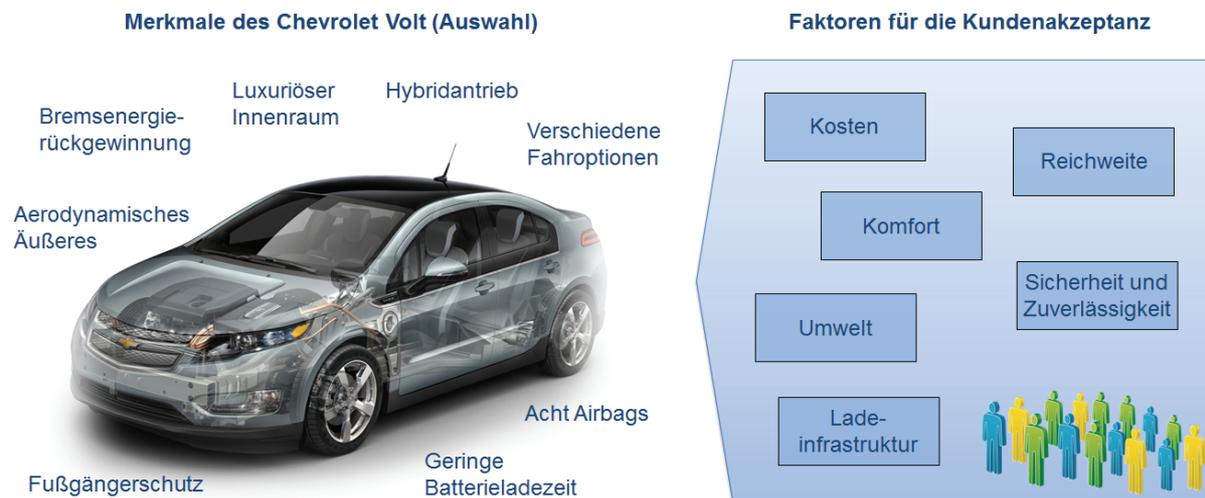


Abbildung 40: Darstellung ausgewählter Merkmale des Hybridfahrzeugs Chevrolet Volt (Bildquelle: GM Media Online) gegenüber Faktoren für die Akzeptanz der Kunden (nach Teichmann et al. 2012, S. 143)

Es stellt sich nun die Frage, wie Unternehmen aus der Mobilitätsbranche grundsätzlich mit der Forderung des Nachhaltigkeitsgedankens umgehen. Das folgende Beispiel zeigt den aktuellen Umgang von europäischen Unternehmen des Automobilbaus mit der Forderung nach mehr Umweltverträglichkeit ihrer entwickelten Fahrzeuge. In den vergangenen Jahren hat die Europäische Union (EU) die Grenzwerte für den CO₂ Ausstoß von Fahrzeugen stetig reduziert. So soll beispielweise der Ausstoß der Neuwagenflotte in Europa auf durchschnittlich 95 Gramm je Kilometer bis zum Jahr 2020 sinken. Dies entspricht in etwa einem Verbrauch von 3 Litern Benzin auf 100 Kilometern, bei heutigen ca. 6 Litern auf 100 Kilometern. In verschiedenen Studien wurde nachgewiesen, dass CO₂ über den Treibhauseffekt maßgeblich zur globalen Erderwärmung, in deren Folge irreparable Schäden der Umwelt und Natur entstehen, beiträgt. Auf diese Umweltforderungen treffen allerdings wirtschaftliche Interessen, insbesondere der deutschen Automobilhersteller. In einem Brief des Verbands der Automobilindustrie (VDA) an die Bundeskanzlerin werden die Vorgaben der EU kritisiert. Argumentiert wird dabei hauptsächlich unter wirtschaftlichen Aspekten. So wird im Brief davor gewarnt, „dass wir [die deutschen Fahrzeughersteller] unser leistungsfähiges und starkes Premiumsegment, das fast 60 Prozent der Arbeitsplätze unserer Automobilhersteller in Deutschland ausmacht, nicht über willkürlich gesetzte Grenzwerte buchstäblich kaputt regulieren lassen dürfen“ (FAZ 2013). Die neuen Vorgaben würden hauptsächlich Premiumfahrzeuge

betreffen, die aufgrund ihrer Größe und technischen Ausstattung per se einen hohen Verbrauch vorweisen. Weiterhin wird im Brief argumentiert, dass es „bei dieser und bei weiteren Regelungen um die Frage [geht], ob die Verordnung wettbewerbsneutral ausgestaltet und damit die Vielfalt innerhalb der europäischen Automobilindustrie berücksichtigt“ werden kann (FAZ 2013). Bricht man diese Kritik aus der Automobilindustrie auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit herunter, ergibt sich folgendes Bild:

1. Ökologische Dimension: Einhalten von Umweltforderungen der Europäischen Union.
2. Soziale Dimension: Sicherung von Arbeitsplätzen an einem Wirtschaftsstandort.
3. Ökonomische Dimension: Sicherstellen der Wettbewerbsfähigkeit einer Branche.

Sowohl die Beispiele verschiedener Automobilhersteller als auch die Stellungnahme des Verbands der Automobilindustrie zeigen auf, dass es kein geschlossenes Lebenszyklusdenken und -management über die einzelnen Akteure (z.B. Politik, Gesellschaft, Unternehmen, Kunde) hinweg im Bereich der Mobilität gibt. Die Frage, die sich nun angesichts dessen stellt, ist, wie ein Konsens erzielt werden kann, der wirtschaftliche, soziale und ökologische Interessen in Einklang bringt. Vor diesem Hintergrund ist es entscheidend, wie sich die Unternehmen verhalten. Dieses Verhalten geht mit der jeweiligen Unternehmenskultur und -philosophie einher. Wie bereits in Abbildung 14 beschrieben, wirkt hier auf normativer Ebene der Einfluss des Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung. An dieser Stelle gilt es herauszufinden, wie Unternehmen im Bereich der Mobilität tatsächlich mit dem Thema Nachhaltigkeit umgehen und wie das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung im Unternehmen verstanden wird.

5.2.2 Systematische Auswahl von Unternehmen

Ziel der systematischen Auswahl ist es, Unternehmen zu identifizieren, die für eine empirische Erhebung zu innerbetrieblichen Abläufen in Frage kommen.

Wie in Abbildung 41 dargestellt, erfolgt zunächst der systematische Auswahlprozess von produzierenden Unternehmen der Mobilitätsbranche. Dazu wird folgende Vorgehensweise herangezogen:

1. Pre-Selection: Im ersten Schritt wurden Unternehmen aus der Mobilitätsbranche identifiziert, die einen freiwilligen, nicht nachweispflichtigen, Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten, sich also zur freiwilligen Einhaltung nachhaltiger Standards verpflichten.
2. Screening: Im zweiten Schritt wurden die ausgewählten Unternehmen dahingehend untersucht, inwieweit sie regelmäßige Nachhaltigkeitsreports anfertigen und diese öf-

fentlich publizieren. Der Grad der Verbindlichkeit in Bezug auf Nachhaltigkeit steigt im Vergleich zu den Unternehmen aus dem ersten Schritt.

3. Expertenrunde: Im dritten Schritt galt es, den innerbetrieblichen Umgang mit Nachhaltigkeitsforderungen zu eruieren. Dabei wurde die operative Planung, Durchführung, Steuerung und Kontrolle von Entwicklungsprojekten der Unternehmen in einer empirischen Erhebung untersucht.

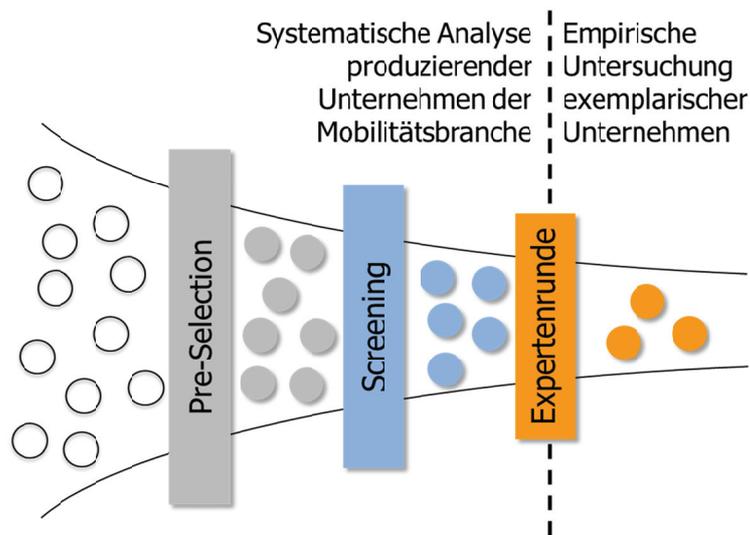


Abbildung 41: Systematischer Auswahlprozess nachhaltig agierender Unternehmen

Aus der Vorgehensweise wird ersichtlich, dass die ersten beiden Schritte dazu dienen, die Außendarstellung nachhaltig agierender Unternehmen zu analysieren und Unternehmen zu identifizieren, die für eine innerbetriebliche Untersuchung in Frage kommen. Im dritten Schritt wurde anschließend in Form einer Expertenrunde mit exemplarisch ausgewählten Unternehmen untersucht, wie Unternehmen mit dem Thema Nachhaltigkeit innerbetrieblich umgehen, d.h. wie Nachhaltigkeitsforderungen im Unternehmen umgesetzt werden.

5.2.2.1 Pre-Selection

In der ersten Stufe wurden nur Unternehmen betrachtet, die sich dem freiwilligen, nicht nachweispflichtigem UN Global Compact verschrieben haben, sich also schriftlich zu den Grundwerten aus den Bereichen Menschenrechte, Arbeitsnormen, Umweltschutz und Korruptionsbekämpfung bekannt haben und diese im Rahmen ihrer unternehmerischen Aktivitäten unterstützen und innerhalb ihres Einflussbereiches in die Praxis umsetzen (UN 2013). In Tabelle 4 sind die zehn Prinzipien entsprechend ihrer Bereiche dargestellt.

Die Analyse der ersten Stufe umfasste alle produzierenden Unternehmen, die sich in den Bereich Mobilität einordnen lassen. Dazu zählen nach dem Global Compact die Sektionen „Aerospace und Defense“ und „Automobiles und Parts“. Weiterhin wurden produzierende

Unternehmen berücksichtigt, die zu den Sektoren „General Industrials“ (z.B. Bombardier Inc. als Flugzeug- und Zughersteller) und „Technology Hardware und Equipment“ (z.B. Siemens AG als Zughersteller) zugehörig sind. Hierbei handelt es sich meistens um Mischkonzerne, aus deren Produktportfolio ein oder mehrere Produkte zur Mobilitätsbranche zählen. Aus Sicht der vertikalen Ebene (vgl. Kapitel 2.5.2) wurden sämtliche Unternehmen betrachtet, die Produkte auf System- und Sub-System-Ebene anbieten (z.B. Flugzeugturbine als Sub-System des gesamten Systems Flugzeug), sich in deren Zuliefererketten befinden oder Dienstleistungen zum System oder Sub-System anbieten.

Bereich	Prinzipien
Menschenrechte	<ul style="list-style-type: none"> • Prinzip 01: Unternehmen sollen den Schutz der internationalen Menschenrechte unterstützen und achten und • Prinzip 02: sicherstellen, dass sie sich nicht an Menschenrechtsverletzungen mitschuldig machen.
Arbeitsnormen	<ul style="list-style-type: none"> • Prinzip 03: Unternehmen sollen die Vereinigungsfreiheit und die wirksame Anerkennung des Rechts auf Kollektivverhandlungen wahren. • Prinzip 04: Unternehmen sollen sich für die Beseitigung aller Formen der Zwangsarbeit einsetzen. • Prinzip 05: Unternehmen sollen sich für die Abschaffung von Kinderarbeit einsetzen. • Prinzip 06: Unternehmen sollen sich für die Beseitigung von Diskriminierung bei Anstellung und Erwerbstätigkeit einsetzen.
Umweltschutz	<ul style="list-style-type: none"> • Prinzip 07: Unternehmen sollen im Umgang mit Umweltproblemen dem Vorsorgeprinzip folgen. • Prinzip 08: Unternehmen sollen Initiativen ergreifen, um größeres Umweltbewusstsein zu fördern. • Prinzip 09: Unternehmen sollen die Entwicklung und Verbreitung umweltfreundlicher Technologien beschleunigen.
Korruptionsbekämpfung	<ul style="list-style-type: none"> • Prinzip 10: Unternehmen sollen gegen alle Arten der Korruption eintreten, einschließlich Erpressung und Bestechung.

Tabelle 4: Die zehn Prinzipien des UN Global Compact (UN 2013)

Das Ergebnis der Analyse umfasst 750 Unternehmen, die sich dem Global Compact verschrieben haben. Dazu zählen gleichermaßen weltweit agierende Konzerne und kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Eine detaillierte Übersicht ist in Anhang III zu finden.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Unternehmen keiner externen Überprüfung durch Dritte bzw. unabhängige Organisationen unterzogen werden, d.h. es gibt keine verbindlichen Festlegungen (beispielsweise in Bezug auf Handlungsprinzipien und Grenzwerte) und die Einhaltung in den Unternehmen wird seitens des UN Global Compact nicht nachverfolgt. Die Vereinbarung basiert also im Wesentlichen auf Vertrauen. Das derzeit einzige Instrument des Global Compact ist die Verpflichtung der Unternehmen zur jährlichen Berichterstattung ihrer Fortschritte und Probleme bei der Einhaltung der zehn Prinzipien. Unternehmen, die keine Berichte erstellen, werden auf der Internetseite der Organisation gesondert aufgeführt. Bei zweimaligem Versäumnis wird die Teilnahme als beendet angesehen und das Unternehmen aus der Datenbank gelöscht.

5.2.2.2 Screening

Nachdem im ersten Schritt die Unternehmen identifiziert wurden, die sich freiwillig, aber nicht nachweispflichtig, zur Einhaltung grundlegender nachhaltiger Prinzipien bekennen, wird im zweiten Schritt überprüft, inwiefern diese Unternehmen ihre nachhaltige Geschäftstätigkeit durch die Veröffentlichung von standardisierten und geprüften Nachhaltigkeitsberichten nachweisen. Im Einzelnen wurden die 750 Unternehmen aus der Phase der Pre-Selection im Screening nach folgenden Merkmalen untersucht:

1. Umfassende Berichterstattung (Berücksichtigung sozialer und ökologischer Nachhaltigkeitsaspekte),
2. Öffentlich zugängliche Nachhaltigkeitsberichte,
3. Extern geprüfte Berichte oder von außen bewertete Unternehmen (Berichte mit geprüftem Informationsgehalt) und
4. Aktuelle Berichterstattung (aus dem Jahr 2013).

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten für Unternehmen, Nachhaltigkeitsberichte anzufertigen. Die Wahl hängt davon ab, welche unternehmerischen Nachhaltigkeitsziele bewertet und kommuniziert werden sollen. Für das Screening der vorliegenden Arbeit wurde die am häufigsten verwendete Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung von der Global Reporting Initiative (GRI) verwendet¹⁶. (KPMG 2013)

Die GRI ist 1997 aus der United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) und der nichtstaatlichen Organisation Coalition for Environmentally Responsible Economics (CERES) hervorgegangen. Es wurde das Ziel verfolgt, einen globalen Standard für

¹⁶ Nach einer Studie von KPMG verwenden 82% der 250 umsatzstärksten Unternehmen der Welt die Richtlinien der GRI für ihre Berichterstattung. Unternehmen aus den Ländern Brasilien, Finnland, Südafrika, Spanien und Schweden sind dazu angehalten, nach GRI Richtlinien Nachhaltigkeitsreports anzufertigen. [KPMG 2013]

die Nachhaltigkeitsberichterstattung als Ebenbild zur Finanzberichterstattung für Unternehmen zu entwickeln, der für alle Unternehmen, unabhängig von Größe, Branche oder Standort gültig ist. Unter Einbeziehung von weltweiten Vertretern aus Wirtschaft, Arbeitgeber- und Arbeitnehmervertretungen, Zivilgesellschaft, Finanzmärkten und Wirtschaftsprüfern sowie weiteren Experten aus verschiedenen Disziplinen wurden in Zusammenarbeit mit Aufsichts- und Regierungsbehörden verschiedener Länder Leitlinien (inkl. Bewertungsindikatoren) zur Nachhaltigkeitsberichterstattung erarbeitet¹⁷. (Fischbach 2007, S. 17ff.; GRI 2013a, S. 5ff.)

Tabelle 5 zeigt die Bewertungskategorien und Aspekte, die bei der Berichterstattung der Unternehmen berücksichtigt werden müssen. Darin wird die Nachhaltigkeit kennzeichnende Interdependenz von wirtschaftlichen, ökologischen und gesellschaftlichen Aspekten ersichtlich. Diese drei Aspekte sind auch Bestandteil der G3-Richtlinien. Anhand der G3-Richtlinien lassen sich drei Kategorien, A, B und C, der Berichterstattung unterscheiden, wobei A die umfangreichste Berichterstattung darstellt (Merkmal 1). Unternehmen, die nach GRI-Richtlinien berichten, müssen darüber hinaus die Ergebnisse der Öffentlichkeit zugänglich machen. Die Berichte werden in die Datenbank der GRI aufgenommen und können von dort öffentlich abgerufen werden (Merkmal 2). Außerdem bietet die GRI eine so genannte „Assurance“ an. Darunter werden Berichte verstanden, deren Informationen durch unabhängige Dritte bestätigt wurden¹⁸. Wird dann wiederum von der GRI geprüft, ob der Bericht durch Dritte bestätigt wurde, können Unternehmen den Status „+“ bekommen und somit nach außen kenntlich machen, dass ihre Berichte nachweislich von Dritter Seite validiert wurden (Merkmal 3). Über die Datenbank der GRI können vergangene und aktuelle Berichte von Unternehmen online eingesehen werden (Merkmal 4).

Aus den vorangegangenen Ausführungen lässt sich schlussfolgern, dass die Nachhaltigkeitsberichterstattung nach GRI alle geforderten Merkmale der Phase des Scenings erfüllt. Die

¹⁷ Unternehmen, die nach GRI-Richtlinien Nachhaltigkeitsberichte erstellen, müssen die derzeit gültige G3-Richtlinie verwenden. Bis Ende des Jahres 2015 dürfen Unternehmen nach den G3-Richtlinien berichten. Ab 2016 sind die G4-Richtlinien verbindlich. Die Kategorien werden durch zwei Berichtsvarianten ersetzt: Unternehmen müssen sich entweder für einen Kernbericht oder einen umfassenden Bericht entscheiden. Die zwei Varianten unterscheiden sich im Umfang des zu berichtenden Inhalts. (Deloitte 2013)

¹⁸ Assurance-Status bekommen Berichte, die folgenden Kriterien gerecht werden:

- „mit der Prüfung wurden Dritte beauftragt, die in der Thematik und den Prüfungspraktiken kompetent sind und die nicht zur Organisation gehören
- es wurden festgelegte Verfahren angewendet, die erläutert werden können und die dokumentiert wurden
- es wurde untersucht, ob der Bericht eine angemessene und ausgewogene Darstellung der Leistung bietet und ob dabei die im Bericht enthaltenen Daten sowie die allgemeine Auswahl des Inhalts berücksichtigt wurden
- die Prüfung führte zu einer Stellungnahme oder verschiedenen Schlussfolgerungen, die den Lesern des Berichts zur Verfügung stehen.“ (GRI 2006)

Unternehmen, die sich dem UN Global Compact verpflichtet haben (Phase der Pre-Selection), können daraufhin auf ihre GRI-Berichterstattung überprüft werden. Über die Online-Datenbank der GRI (GRI 2013b) wurden für die empirische Erhebung im Rahmen dieser Arbeit entsprechend die Unternehmen identifiziert, die umfangreiche Nachhaltigkeitsberichte erstellen (Kategorie A) und darüber hinaus geprüft sind („+“-Status).

TABELLE 1: KATEGORIEN UND ASPEKTE IN DEN LEITLINIEN

Kategorie	Wirtschaftlich		Ökologisch	
Aspekte ^{III}	<ul style="list-style-type: none"> Wirtschaftliche Leistung Marktpräsenz Indirekte wirtschaftliche Auswirkungen Beschaffung 		<ul style="list-style-type: none"> Materialien Energie Wasser Biodiversität Emissionen Abwasser und Abfall Produkte und Dienstleistungen Compliance Transport Insgesamt Bewertung der Lieferanten hinsichtlich ökologischer Aspekte Beschwerdeverfahren hinsichtlich ökologischer Aspekte 	
Kategorie	Gesellschaftlich			
Unter-kategorien	Arbeitspraktiken und menschenwürdige Beschäftigung	Menschenrechte	Gesellschaft	Produktverantwortung
Aspekte ^{III}	<ul style="list-style-type: none"> Beschäftigung Arbeitnehmer-Arbeitgeber-Verhältnis Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz Aus- und Weiterbildung Vielfalt und Chancengleichheit Gleicher Lohn für Frauen und Männer Bewertung der Lieferanten hinsichtlich Arbeitspraktiken Beschwerdeverfahren hinsichtlich Arbeitspraktiken 	<ul style="list-style-type: none"> Investitionen Gleichbehandlung Vereinigungsfreiheit und Recht auf Kollektivverhandlungen Kinderarbeit Zwangsarbeit oder Pflichtarbeit Sicherheitspraktiken Rechte der indigenen Bevölkerung Prüfung Bewertung der Lieferanten hinsichtlich Menschenrechte Beschwerdeverfahren hinsichtlich Menschenrechtsverletzungen 	<ul style="list-style-type: none"> Lokale Gemeinschaften Korruptionsbekämpfung Politik Wettbewerbswidriges Verhalten Compliance Bewertung der Lieferanten hinsichtlich gesellschaftlicher Auswirkungen Beschwerdeverfahren hinsichtlich gesellschaftlicher Auswirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> Kundengesundheit und -sicherheit Kennzeichnung von Produkten und Dienstleistungen Marketing Schutz der Kundendaten Compliance

Tabelle 5: Bewertungskategorien und Aspekte (Indikatoren) der Nachhaltigkeitsberichterstattung nach den G4-Richtlinien der Global Reporting Initiative (GRI 2013a, S. 9)

Abbildung 42 zeigt ein entsprechendes Beispiel für einen Datenbankabruf der GRI Sustainability Disclosure Database für die MAN Group (GRI 2014). Darauf zu sehen ist unter anderem der Status der Berichterstattung („A+“), der GRI-Status („GRI-checked“, also von GRI geprüft), dass sich das Unternehmen extern bewerten ließ („External assurance“) und welches Unternehmen den Bericht extern bestätigt hat („Pricewaterhouse Coopers“).

2013 Corporate Responsibility Report			
☆☆☆☆☆ (0 votes)			
MAN Group			
Publication year:	2014	CDP:	✓
Reporting period:	? - ?	IFC:	✗
Reporting cycle:	-	OECD:	✓
Report type:	GRI - G3	UNGC:	✓
Adherence level:	A+	ISO:	✗
Status:	GRI-checked	AA1000:	✗
Sector disclosures/ Sector supplement:	Not Applicable	Stakeholder Panel/ Expert Opinion:	✓
Integrated:	✗	External assurance:	✓
Number of pages:	-	Type of Assurance Provider:	Accountant
Report language:	-	Assurance Provider:	Pricewaterhouse Coopers
		Assurance Scope:	Entire sustainability report
		Level of Assurance:	Limited/moderate
		Assurance Standard AA1000AS:	✗
		Assurance Standard ISAE3000:	✓
		Assurance Standard: national (general):	✓
		Assurance Standard: national (sustainability):	✓

Abbildung 42: Ergebnisdarstellung einer Datenbankabfrage der GRI Sustainability Disclosure Database, beispielhaft für das Unternehmen MAN Group (GRI 2014)

In Tabelle 6 ist das Ergebnis des Screenings dargestellt. Von den 750 Unternehmen, die sich dem Global Compact verpflichtet haben, erstellen 35 Unternehmen Nachhaltigkeitsberichte nach den oben beschriebenen Merkmalen. Eine vollständige Liste der Unternehmen ist in Anhang IV zu finden.

Insgesamt zeigt sich, dass lediglich 35 Unternehmen, die sich dem Global Compact verpflichtet haben, auch umfassende und extern geprüfte Nachhaltigkeitsberichte erstellen. Dies entspricht einem prozentualen Anteil von 5%. Im Bereich Aerospace and Defense ist die Gesamtzahl der berichterstattenden Unternehmen zwar gering (5), prozentual gesehen an den Unternehmen, die auch den UN Global Compact unterstützen, jedoch am größten (13%). Bei Unternehmen der Branche General Industrials bzw. Technology Hardware sind sowohl die Anzahl der Unternehmen (13 bzw. 6) als auch der prozentuale Anteil (3% bzw. 4%) gering.

Unternehmen der Automobiles and Parts Branche liegen mit einer Anzahl von 11 und einem prozentualen Anteil von 9% zwischen den anderen beschriebenen Branchen.

	Pre-Selection	Screening
	<i>United Nations Global Compact</i>	<i>Global Reporting Initiative A+</i>
Aerospace and Defense	42	5 (13%)
Automobiles and Parts	122	11 (9%)
Technology Hardware	146	6 (3%)
General Industrials	440	13 (4%)
Gesamt	750	35 (5%)

Tabelle 6: Übersicht der Ergebnisse der Pre-Selection und des Screenings

Im Bereich Aerospace and Defense verleiben nach dem Screening vier Flughafenbetreiber und eine Fluggesellschaft. Flugzeughersteller, wie beispielsweise Airbus (letzter Stand: 2008, Kategorie: nicht benannt, Staus: undeclared) und Embraer (letzter Stand: 2013, Kategorie: B, Status: GRI-checked), bieten entweder veraltete, nicht umfassende oder ungeprüfte Nachhaltigkeitsberichte an.

Im Bereich Automobiles and Parts befinden sich acht Unternehmen, die Mobilitätslösungen produzieren und an Nutzer vertreiben (B2C), sowie drei Unternehmen, die überwiegend im B2B tätig sind.

In den Bereichen General Industrials und Technology Hardware überwiegt die Anzahl der B2B Unternehmen. So sind zwölf Unternehmen hauptsächlich im B2B, fünf Unternehmen in B2B und B2C zu finden. Ein Unternehmen ist dem B2C Bereich zuzuordnen. Werden die Unternehmen betrachtet, die sich zwar dem UN Global Compact verschrieben haben, aber nicht nach GRI-Richtlinie auf Kategorie „A+“ einzuordnen sind, so sind diese überwiegend im B2B Bereich tätig.

Die Analyse in der Screening-Phase lässt die Schlussfolgerung zu, dass viele Unternehmen im Bereich der Mobilität den Eindruck erwecken, nachhaltig zu agieren. Werden sie jedoch einer genauen Überprüfung unterzogen werden, reduziert sich die Anzahl der Unternehmen deutlich. Darüber hinaus zeigt sich, dass Unternehmen, die vorrangig im B2C Bereich tätig sind, eine höhere Bereitschaft aufzeigen, geprüfte Nachhaltigkeitsberichte anzufertigen und zu veröffentlichen, als Unternehmen, die im B2B Bereich agieren.

5.2.3 Auswahl der Expertenrunde

Ziel der systematischen Auswahl war es, Unternehmen zu identifizieren, die für eine empirische Erhebung zu innerbetrieblichen Abläufen in Frage kommen. Mit den Schritten der Pre-

Selection und des Screenings konnten somit 35 Unternehmen der Mobilitätsbranche identifiziert werden.

Diese Unternehmen sind zwar alle im Bereich der Mobilität tätig, bilden aber für eine Expertenrunde eine zu heterogene Gruppe, weil die Teilbereiche, in denen die Unternehmen tätig sind, zu unterschiedlich sind. Die Nachhaltigkeitsforderungen, die sich aus externer und interner Verbindlichkeit ergeben, variieren bei den 35 Unternehmen zu stark. Stattdessen sollte die Expertengruppe, um aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können, aus einer homogenen B2B und B2C Beziehung bestehen. Für die Expertenrunde im Rahmen der vorliegenden Arbeit galt es daher, ein Unternehmen aus den 35 exemplarisch auszuwählen und das entsprechende Umfeld aus B2B und B2C mit zu berücksichtigen.

Für die Expertenrunde wurden schließlich auch Experten ausgewählt, die das Produkt bzw. System in einer B2C-Beziehung nutzen. Auf diese Weise wurde dem Umstand Rechnung getragen, dass es aus unternehmerischer Sicht mit Blick auf das Prinzip der externen Verbindlichkeit (vgl. Kapitel 2.4), notwendig ist, die zukünftigen Nutzer bei der Definition von Nachhaltigkeitszielen einzubinden.

Ebenfalls in die Expertenrunde aufgenommen wurden Experten aus B2B-Beziehungen des ausgewählten Unternehmens. Ihre Aufnahme liegt darin begründet, dass Entwicklungsprozesse heutzutage in vielen Unternehmen durch die Einbindung externer Partner unterstützt werden, sie somit Teil des Entwicklungsprozesses sind und auch Verantwortung für die Umsetzung von Nachhaltigkeitsforderungen tragen. Zugleich sind die Interessen und Ziele der Beteiligten für die Definition und Umsetzung von Nachhaltigkeitsforderungen in Bezug auf ein gesamtes Produkt bzw. System von zentraler Bedeutung. So sind zum einen Unternehmen der Mobilitätsbranche im Bereich B2B auf unterschiedlichen Systemebenen zu finden (z.B. Flugzeugtriebwerke werden als System in das höhere System des Flugzeugs integriert); zum anderen besitzen die Betreiber des Produktes bzw. Systems (z.B. Fluggesellschaft) vielfach eine B2B-Beziehung zum Systemintegrator.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen wurden zur Expertenrunde schließlich Vertreter/innen von exemplarisch ausgewählten Unternehmen der Mobilitätsbranche aus den Bereichen Entwicklung und Fertigung von Turbomaschinen sowie aus dem Lebenszyklsumfeld von Turbomaschinen eingeladen. Unter dem Titel „Nachhaltigkeitsziele bei der Entwicklung von Turbomaschinen“ kamen so insgesamt acht Experten auf der ILA Berlin Air Show (Internationale Luftfahrtausstellung Berlin) im Jahr 2014 zusammen. Sie vertreten im Einzelnen wiederum die folgenden Bereiche:

- Strategische Beratung (eine Person, KMU),
- Forschung (zwei Personen),
- Entwicklung (zwei Personen, davon eine aus KMU),
- Fertigung (eine Personen, KMU),
- Vertrieb (eine Person, KMU) und
- Betreiber (eine Person).

Die Erhebung und das Ergebnis dieser Expertenrunde werden in den folgenden Kapiteln dargelegt.

5.3 Erhebung

5.3.1 Methode

Um einen Einblick in die innerbetriebliche Umsetzung des Konzeptes einer nachhaltigen Entwicklung zu bekommen, wurde, wie dargelegt, eine Expertenrunde eingeladen.

Mit Bezug zur Prozess- und Methodenebene der Forschungsfragen aus Kapitel 1.2 wurden folgende Zielstellungen mit der Expertenrunde erarbeitet bzw. erläutert:

- Identifikation von Nachhaltigkeitszielen, die für produzierende Unternehmen relevant sind, und entsprechenden Umsetzungsmaßnahmen im Unternehmen,
- Evaluierung des Ist-Zustandes der Verankerung von Nachhaltigkeitsprinzipien in produzierenden Unternehmen von der normativen bis zur operativen Ebene und
- Entwicklung einer Roadmap zur Identifikation von zukünftigen Handlungsfeldern.

5.3.2 Durchführung

Die Expertenrunde wurde in folgenden fünf Schritten durchgeführt:

1. Einführung in Form eines Impulsvortrags: Es erfolgte eine Vorstellung der internen und externen Verbindlichkeit von Nachhaltigkeit (vgl. Abbildung 10) und eine Erläuterung der normativen, strategischen und operativen Ebene der Nachhaltigkeitspyramide (vgl. Abbildung 14).
2. Kartenabfrage und Diskussion zum aktuellen Stand der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten im Unternehmen: Die Experten/innen erfassten zunächst Maßnahmen zur Implementierung und Zielstellungen von Nachhaltigkeit in den Entwicklungsprozessen ihrer Unternehmen. Anschließend wurden die Maßnahmen und Zielstellungen von jedem Teilnehmenden vor der gesamten Runde vorgestellt und auf eine Ebene der Nachhaltigkeitspyramide eingeordnet.

3. Impulsvortrag zu Technologien und Prozessen für die Entwicklung und Fertigung von nachhaltigen Turbomaschinen: Aus einer Forschungseinrichtung wurde ein Vortrag über aktuelle Trends in der angewandten Forschung gehalten. Im Vortrag wurde im Wesentlichen auf folgende zwei Themen eingegangen:
 - Prüfung der Erfüllbarkeit von Nachhaltigkeits-Zielvorgaben mittels analytischer Methoden am Beispiel der Ökobilanzierung von Additive-Manufacturing Prozessen und
 - Gestaltung des Feedbacks der Zielerreichung von der Fertigung in die Entwicklung zur ökologischen Verbesserung nachfolgender Produktentwicklungen.
4. Diskussion von zukünftigen Nachhaltigkeitszielstellungen und Erstellen einer Roadmap für zukünftige Handlungsfelder in Unternehmen: Auf den Impulsvortrag folgend wurden Zielstellungen und Maßnahmen für den zukünftigen Umgang mit dem Thema Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz im Unternehmen diskutiert. Daran anschließend wurden die in der Kartenabfrage (Schritt 2) erarbeiteten Maßnahmen und Zielstellungen hinsichtlich individuell empfundener Wichtigkeit priorisiert und entlang einer Roadmap eingeordnet.
5. Zusammenfassung der Expertenrunde: Die erarbeiteten Inhalte wurden abschließend zusammengefasst und zusammenhängend dargelegt.

5.4 Ergebnisse

5.4.1 Deskriptive Darstellung

Die Experten haben Nachhaltigkeitsforderungen definiert und auf den Ebenen der Nachhaltigkeitspyramide eingeordnet. Dabei wurden von den Experten Argumentationsketten bzw. logische Abhängigkeiten von der normativen über die strategische bis hin zur operativen Ebene aufgestellt. Die Mehrheit ging dabei deduktiv vor, d.h. beginnend mit einer Zielstellung auf normativer Ebene wurde, über entsprechende strategische Maßnahmen im Unternehmen, die operative Umsetzung in den entwickelnden und konstruierenden Abteilungen beschrieben. Ein Beispiel hierfür lautet: Das Ziel „NOx-Emissionen reduzieren“ (normative Ebene) erfordert eine gesteigerte Turbineneingangstemperatur („Ti [°C] steigern“, strategische Ebene), was wiederum durch die „Materialien und Beschichtungssysteme“ bestimmt wird. Letzteres wird in der operativen Produktentwicklung ausgewählt und für die Konstruktion ausgelegt. Das Ergebnis der Kartenabfrage (siehe Kapitel 5.3.2) lässt sich wie folgt zusammenfassen (siehe Abbildung 43).



Abbildung 43: Ergebnisdarstellung der Expertenbefragung zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten und Entwicklungszielen im Unternehmen

Darüber hinaus befand ein Experte, dass im Bereich B2B das Thema Nachhaltigkeit eine untergeordnete Rolle spielt und die Kostenargumente überwiegen. Dem gegenüber stehen B2C Beziehungen, bei denen Kunden zunehmend umweltfreundlichere Produkte fordern. Dem wurde von allen Experten zugestimmt.

Weiterhin waren sich die Experten darin einig, dass bei Nachhaltigkeitszielstellungen technologische und unternehmerische Ziele differenziert betrachtet werden sollten. Auch hier spielt die Kundenbeziehung, B2B oder B2C, eine treibende Rolle. Im Bereich B2B gilt es zwar, technologisch hochwertige Produkte zu entwickeln, allerdings zu einem annehmbaren Preis. Dagegen fordern Kunden aus B2C Beziehungen vorrangig technologisch ausgereifte Produkte, die niedrige Betriebskosten aufweisen.

Kritisch wurde von einem Experten angemerkt, dass Bewertungsprozesse zum Nachweis von Ressourceneffizienz noch nicht in Form von standardisierten Prozessen etabliert sind, d.h. diese gegenwärtig kein fester Bestandteil von Entwicklungsprozessen sind. Auf Kundenwunsch werden allerdings entsprechende Nachweise erbracht. Diese Nachweise werden mit kurzfristig organisierten Projektteams für ein spezifisches Projekt durchgeführt; sie sind in der Regel aber mit zusätzlichem Aufwand und zusätzlichen Kosten verbunden. Die Mehrheit der Experten schloss sich dieser Meinung an.

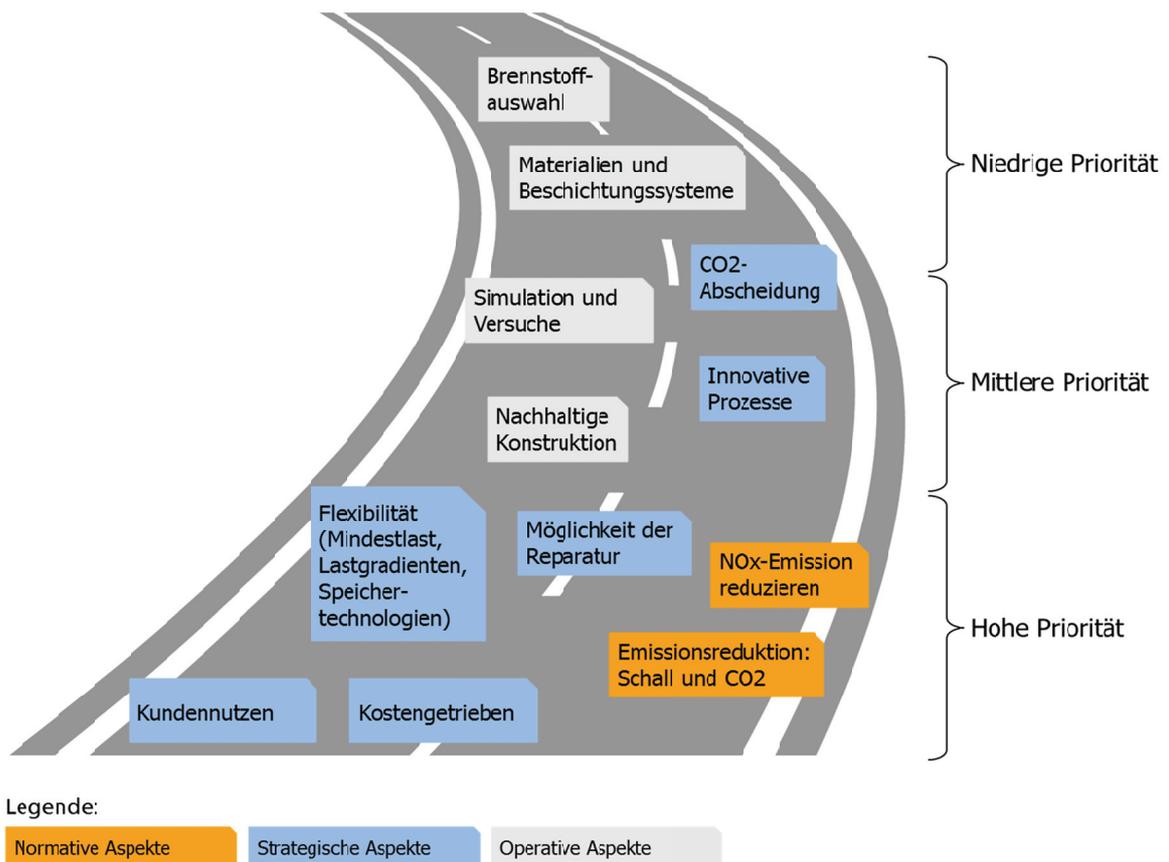


Abbildung 44: Ergebnis der Roadmap entsprechend der Experteneinschätzung zur Priorisierung von zukünftigen Nachhaltigkeitszielstellungen

Ein weiteres Ergebnis der Expertenrunde bildet eine Roadmap in Bezug zur Priorisierung von zukünftigen Nachhaltigkeitszielstellungen (vgl. Kapitel 5.3.2). Diese Roadmap ist Abbildung 44 zu entnehmen.

Nachdem die Roadmap entwickelt wurde, wurden abschließend durch die Experten dringliche Handlungsfelder formuliert (Abbildung 45). Dabei fanden die folgenden vier Nachhaltigkeitsaspekte Berücksichtigung:

- „Flexibilität (Mindestlast, Lastgradienten, Speichertechnologien)“,
- „Kostengetrieben“,
- „NOx-Emissionen“ und
- „Emissionsreduktion von Schall und CO2“.

Die letzten beiden Aspekte wurden von der Expertengruppe aufgrund ihrer ähnlichen Zielstellung thematisch zusammengefasst und auch zusammenhängend für die Definition von Handlungsfeldern betrachtet (vgl. Abbildung 45).

Von einem Experten wurde in diesem Zusammenhang angemerkt, dass die Effektivität (im Sinne der Turbinenleistung) einer modularen Bauweise nicht annähernd so hoch sei wie die

Effektivität einer Turbomaschine, die nach Integralbauweise entwickelt und gefertigt wurde. Nach einer kontroversen Diskussion lässt sich letztendlich festhalten, dass diese Auffassung nicht alle Experten teilen. Entsprechende Vergleiche und Nachweise wären demnach mit Simulationen und physischen Versuchen zu erproben.

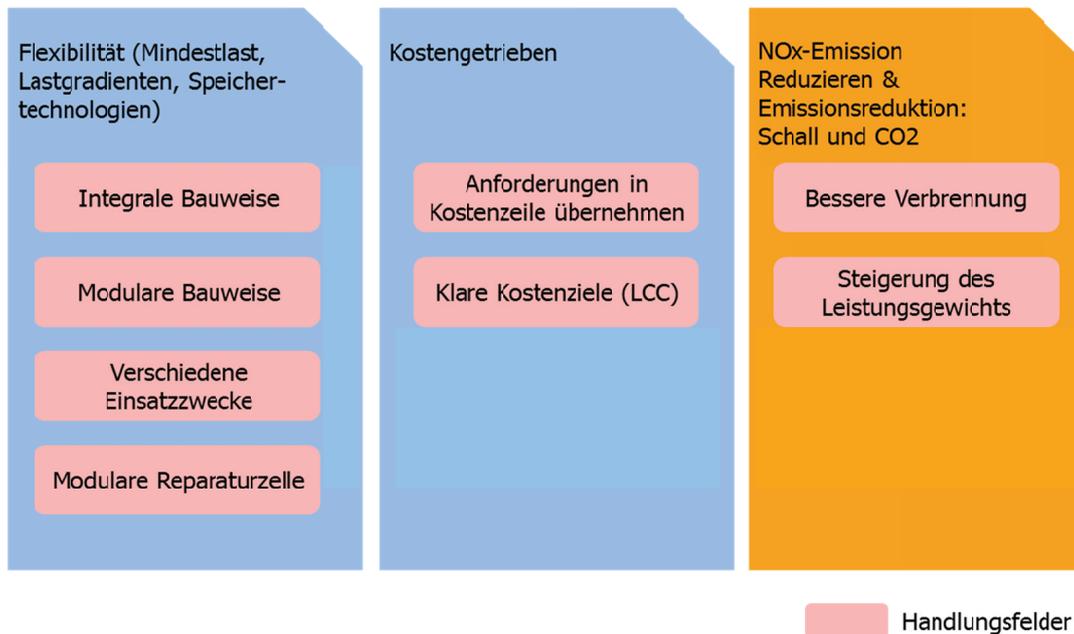


Abbildung 45: Dringliche Handlungsfelder nach Einschätzung der Experten

5.4.2 Interpretation der Ergebnisse

Die Expertenrunde wurde durchgeführt, um den innerbetrieblichen Umgang mit Nachhaltigkeitsaspekten exemplarisch im Bereich der Mobilitätsbranche zu erfassen. Es wurde untersucht, wie Nachhaltigkeitsforderungen aus normativer, strategischer operativer Sicht im industriellen Umfeld berücksichtigt werden.

Grundlegend lässt sich festhalten, dass bei den befragten Experten eine klare Vorstellung davon existiert, wie normative Nachhaltigkeitsziele in Strategien umgewandelt und letztendlich operativ umgesetzt werden können. Dies wurde besonders am Beispiel der ökologischen Ziele über NOx- und CO2-Emissionen deutlich. Die Ziele basieren auf gesetzlichen Verordnungen und Vorschriften und sind in den Unternehmen auf normativer Ebene fest verankert. Auf strategischer Ebene werden die normativen Vorgaben aufgegriffen und im Entwicklungsprozess in Form von Meilensteinvorgaben etabliert. Hier sind meist Standardprozesse der Entwicklung vorhanden, in denen entsprechende Zielvorgaben zu bestimmten Meilensteinen erfüllt werden müssen. Auf operativer Ebene konstituieren sich damit verbunden die Handlungsfelder, die in Abbildung 45 dargestellt sind. Damit wird von Experten eine Kaskade beschrieben, wie Nachhaltigkeitsforderungen in den Unternehmen umgesetzt werden.

Diese Kaskade erlaubt Einblicke in die verschiedenen Unternehmensebenen und ermöglicht das Erkennen von übergreifenden Handlungssträngen. In der Reichweite ihrer Gültigkeit ist die Kaskade jedoch eingeschränkt: Normative und strategische Nachhaltigkeitsaspekte lassen sich, wie Abbildung 42 zeigt, nicht immer scharf voneinander abgrenzen. Darüber hinaus werden Nachhaltigkeitszielen auf normativer und strategischer Ebene eine höhere Priorität zugemessen als auf operativer Ebene. Zugleich gibt es auf operativer Ebene keine oder nur wenige konkrete Nachhaltigkeitszielsetzungen. Diese Erkenntnis lässt drei Schlussfolgerungen zu:

1. Es gibt eine „Übersetzungsproblematik“ von normativen und strategischen in operative Zielstellungen. Es mangelt an methodischen Vorgehensweisen und dem Verständnis von betroffenen Personen. Entsprechende Methoden sind nicht etabliert und Personen im operativen Geschäft bringen nur wenig Verständnis für Nachhaltigkeitsziele auf. Besonders in KMU scheint oftmals keine standardisierte Methodik zur Integration von Nachhaltigkeitszielen vorhanden zu sein.
2. Unterschiedliche Produkte, auch innerhalb einer Branche, erfordern unterschiedliche Entwicklungsprinzipien. Es lassen sich keine einheitlichen produkt- und branchenübergreifende Nachhaltigkeitsziele definieren, die auch einheitliche Handlungsweisen bzw. Prinzipien in der Entwicklung zur Folge hätten. In diesem Zusammenhang werden Prinzipien wie beispielsweise Leichtbau nicht per se als nachhaltig angesehen.
3. Konkrete (operative) ökologische und soziale Ziele kollidieren mit anderen Zielvorgaben und müssen sich denen unterordnen. Die Ziele Kundennutzen und Kosten dominieren die Produktentwicklung. In der Entwicklungspraxis spielen nachhaltige Ziele deswegen nur eine untergeordnete Rolle und werden bei zunehmend effizienten Entwicklungsprozessen (Zeit- und Kostendruck) weggelassen, d.h. nicht in konkrete Handlungsweisen transferiert.

5.4.3 Auswertung der Ergebnisse

Anhand der empirischen Erhebung und der darauf aufbauend durchgeführten Expertenrunde wurde am Beispiel der Mobilitätsbranche der Frage nachgegangen, wie produzierende Unternehmen das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung innerbetrieblich implementieren und realisieren – und welche wesentlichen Hürden dabei auftreten. Dabei wurde untersucht, wie Nachhaltigkeitsforderungen in die operative Planung, Durchführung, Steuerung und Kontrolle von industriellen Entwicklungsprojekten eingebracht und berücksichtigt werden.

Aus der empirischen Erhebung geht hervor, dass ein Großteil der Unternehmen aus der Mobilitätsbranche das Thema Nachhaltigkeit hauptsächlich auf der normativen und strategi-

schen Unternehmensebene berücksichtigt. Bei der Konkretisierung von Werten für beispielsweise öffentliches Nachhaltigkeits-Reporting sinkt die Anzahl der bereitwilligen Unternehmen stark ab. Dies könnte daran liegen, dass Unternehmen keinen Mehrwert darin sehen, konkrete Zahlen zu veröffentlichen. Das Ergebnis der weitergeführten Expertenrunde mit Teilnehmenden von Unternehmen, die detailliertes Nachhaltigkeits-Reporting betreiben, lässt eine derartige Interpretation jedoch nicht zu. Hierbei wurden stattdessen Kernprobleme (vgl. Kapitel 5.4.2) herausgearbeitet, die eine durchgängige Umsetzung von Nachhaltigkeitsforderungen aus normativer Sicht über strategische in operative Nachhaltigkeitsforderungen derzeit erschweren. Diese Kernprobleme können wie folgt interpretiert werden:

1. Nachhaltigkeitsforderungen stellen keine Entwicklungsziele per se dar: Ein durchgängiges Verständnis von Nachhaltigkeit muss von der normativen über die strategische bis zur operativen Unternehmensebene im Bereich der Produktentwicklung geschaffen werden.
2. Unterschiedliche Produkte erfordern unterschiedliche Entwicklungsprinzipien: Eine methodische Unterstützung des operativen Entwicklungsprozesses muss produktspezifisch ausgearbeitet werden.
3. Entwicklungs- und Produktionskosten sowie der Produktpreis dominieren das Entwicklungsgeschäft: Nachhaltigkeitsforderungen müssen insbesondere mit Kostenzielen in Einklang gebracht werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es aus industrieller Sicht einen Mangel an methodischen Vorgehensweisen für die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsforderungen gibt. Darüber hinaus bringen Personen im operativen Geschäft nur wenig Verständnis für die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitszielen, zusätzlich zu anderen Entwicklungszielen, auf. Die Berücksichtigung von legislativen Vorgaben bildet hierbei eine Ausnahme.

6 Handlungsbedarf

Der Forschungsbedarf (Kapitel 4) und die Ergebnisse der Studie zum Lebenszyklusdenken und -handeln in der industriellen Praxis (Kapitel 5) werden im Folgenden zusammengeführt und als Handlungsbedarf beschrieben (Kapitel 6.1). Im Anschluss daran werden die Forschungsfragen detailliert (Kapitel 6.2.).

6.1 Darstellung des Handlungsbedarfs

Mit Ausnahme von gesetzlichen Vorgaben und kostengetriebenen Produkt- oder Prozessverbesserungen sind nachhaltige Ziele in den Unternehmen nicht durchgängig umgesetzt: Lebenszyklusdenken und -handeln wird nicht konsequent umgesetzt. Petersen fasst die Ausgangssituation zur Entwicklung nachhaltiger Produkte in unternehmen treffend zusammen: „Corporate sustainability declarations still have yet to trickle down into becoming a regular part of the design process.“ (Petersen 2012, S. 69)

Nidomolu et al. schlagen in diesem Zusammenhang ein vielversprechendes Stufenmodell zur Integration von Nachhaltigkeit in Unternehmen vor (Abbildung 46). Auf der ersten Stufe steht die Compliance von Unternehmen, die Unternehmen müssen also Sorge dafür tragen, dass die entwickelten Produkte über den Lebensweg gesetzeskonform sind. Zugleich geht es auf dieser Stufe darum, neue Technologien, Materialien und Prozessen innerhalb des Unternehmens auszuprobieren, um die Nachhaltigkeit der entwickelten Produkte zu erhöhen. Auf der zweiten Stufe wird die gesamte Wertschöpfung, d.h. auch unter Berücksichtigung Betrachtung der Vorprozessketten und der nachgelagerten Produktlebensphasen in den Blick genommen. Ziel ist eine nachhaltige Gestaltung aller Produktlebensphasen. Impulse zur Steigerung der Nachhaltigkeit der Produkte werden auf dieser Ebene durch die Verwendung nachhaltiger Materialien, dem Einsatz erneuerbarer Energien zur Produktion sowie durch das Aufsetzen neuer Prozesse zur Rückführung von (Teil-) Produkten gegeben. Die dritte Stufe beschreibt das Gestalten und Entwickeln nachhaltiger Produkte und Dienstleistungen. Potentiale bezüglich der Umweltverträglichkeit liegen hier in einer entsprechenden Neuentwicklung

erschlossen. Auf der höchsten Stufe, der Stufe der neuen Geschäftsmodelle, liegt das Potential für eine erhöhte Nachhaltigkeit in der Gestaltung ganzer Wertschöpfungsketten. Hierfür wird die Integration von physischen und virtuellen Infrastrukturen erforderlich. (Nidumolu et al. 2009)

Stage 1 Viewing Compliance as Opportunity	Stage 2 Making Value Chains Sustainable	Stage 3 Designing Sustainable Products and Services	Stage 4 Developing New Business Models
<p>Central Challenge To ensure that compliance with norms becomes an opportunity for innovation.</p> <p>Competencies Needed</p> <ul style="list-style-type: none"> - The ability to anticipate and shape regulations - The skill to work with other companies, including rivals, to implement creative solutions. <p>Innovation Opportunity</p> <ul style="list-style-type: none"> - Using compliance to induce the company and its partners to experiment with sustainable technologies, materials and processes. 	<p>Central Challenge To increase efficiencies throughout the value chain.</p> <p>Competencies Needed</p> <ul style="list-style-type: none"> - Expertise in techniques such as carbon management and life-cycle assessment. - The ability to design operations to use less energy and water, produce fewer emissions and generate less waste. - The capacity to ensure that suppliers and retailers make their operations ecofriendly. <p>Innovation Opportunity</p> <ul style="list-style-type: none"> - Developing sustainable sources of raw materials and components. - Increasing the use of clean energy sources such as wind and solar power. - Finding innovative uses for returned products. 	<p>Central Challenge To develop sustainable offerings or redesign existing ones to become eco-friendly.</p> <p>Competencies Needed</p> <ul style="list-style-type: none"> - The skill to know which products or services are most unfriendly to the environment. - The ability to generate real public support for sustainable offerings and not be considered as „green-washing“. - The management know-how to scale both supplies of green materials and the manufacture of products. <p>Innovation Opportunity</p> <ul style="list-style-type: none"> - Developing compact and eco-friendly packaging. 	<p>Central Challenge To find novel ways of capturing value, which will change the basis of competition.</p> <p>Competencies Needed</p> <ul style="list-style-type: none"> - The capacity to understand what consumers want and to figure out different ways to meet those demands. - The ability to understand how partners can enhance the value of offerings. <p>Innovation Opportunity</p> <ul style="list-style-type: none"> - Developing new delivery technologies that change value-chain relationships in significant ways. - Creating monetization models that relate to services rather than products. - Devising business models that combine digital and physical infrastructures.

Abbildung 46: Herausforderungen, Qualifikationen und Innovationspotentiale von Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung (Nidumolu et al. 2009)

Die Studie zum Lebenszyklusdenken und -handeln in der industriellen Praxis (siehe Kapitel 5) zeigt auf, dass im Bereich der Mobilität die ersten beiden Stufen des Modells von Nidumolu et al. bereits in der Umsetzung sind, d.h. die Herausforderungen und Potentiale wurden von den Unternehmen erkannt, die eigene Verantwortung für eine nachhaltige Produktentwicklung angenommen. Dies zeigt sich darin, dass legislative Vorgaben in den Unternehmen umgesetzt werden und die Produktverantwortung über den Lebenszyklus, insbesondere der Vorprozessketten, wahrgenommen wird. Der Grad der Verbindlichkeit umfasst hierbei – gemessen an dem Modell von Schäfers – alle drei Stufen: Muss (z.B. Gesetzgebung), Soll (z.B. Richtlinien) und Kann (z.B. freiwillige Angaben) (vgl. Kapitel 2.4, Schäfers 2008, S. 31f.).

Der erhobene Stand der Technik (Kapitel 3) bestätigt die Erkenntnisse der Studie bezüglich der Stufen 1 und 2 des Modells von Nidumolu et al. aus wissenschaftlicher Sicht. Im Bereich des Lebenszyklusdenkens und -handelns werden umfassende Methoden für die Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in alle Unternehmensebenen angeboten (vgl. Kapitel 3.1). Hier hat sich die Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) maßgeblich durchgesetzt. Damit können Prozessketten nach unterschiedlichen Aspekten bewertet und entsprechende Hand-

lungsfelder abgeleitet werden. Außerdem existieren in diesem Zusammenhang viele Richtlinien und Normen, insbesondere im Bereich der Environmental Management Systems. Zugleich werden im Bereich der informationstechnischen Unterstützung und Wissensverarbeitung Softwaresysteme und Datenbanken bereitgestellt, die das Entwickeln von nachhaltigen Produkten fördern (Kapitel 3.2). Sie erlauben Analysemöglichkeiten, Ergebnisansichten und Wirkungsabschätzungen in Bezug auf Produkt und Prozesse; häufig sind sie ineinander integriert. Zu beachten ist, dass sowohl die Softwaresysteme als auch die Datenbanken im Grad ihrer Genauigkeit bei der Modellierung und Analyse von Lebenszyklusinformationen variieren. Es muss deshalb unternehmensspezifisch ausgewählt werden, welche Nachhaltigkeitsbeeinflussung und -beurteilung erwünscht und notwendig ist.

Die Studie zum Lebenszyklusdenken und -handeln in der industriellen Praxis zeigt schließlich auch auf, dass die meisten Unternehmen mit der Integration von Nachhaltigkeit auf den Stufen 3 und 4 des Modells von Nidomolu et al. Schwierigkeiten haben. Diese Schwierigkeiten sind insbesondere dadurch begründet, dass einerseits die methodische Unterstützung des Entwicklungsprozesses produktspezifisch erfolgen muss und andererseits die Nachhaltigkeitsforderungen mit Kostenzielen in Einklang gebracht werden müssen (vgl. Kapitel 5.4). Darüber hinaus lässt sich ein Defizit an methodischen Vorgehensweisen zum Definieren und Erzielen von Nachhaltigkeitszielen und einem entsprechenden Verständnis von Produktentwicklern und deren Verantwortlichen hierfür konstatieren.

Dieser Umstand spiegelt sich auch im Stand der Technik (Kapitel 3) wider. Hier wird deutlich, dass die Entwicklung nachhaltiger Produkte oftmals noch als ein neuer Ansatz verstanden und nicht in bestehende Vorgehensweisen von Unternehmen integriert wird (vgl. Kapitel 3.1). Ein zentraler Grund für dieses additive Vorgehen liegt darin, dass Unternehmen das Risiko eines Einsatzes theoretisch entwickelter Methoden ohne vorherige Validierung aus ökonomischen Gründen selten eingehen. Erschwerend hinzu kommt, dass bestehende Wissens- und Informationstechnologien bisherige Lösungsansätze des Lebenszyklusdenkens noch unzureichend integrieren (Kapitel 3.2).

Das größte Potential zum Umsetzen des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung in die Produktentwicklung lässt sich in Bezug auf Stufe 3, der Stufe zum Gestalten und Entwickeln nachhaltiger Produkte und Dienstleistungen (nach Nimodolu et al.), feststellen. Für eine erfolgreiche Umsetzung bedarf es allerdings eines übergeordneten Modells bzw. einer übergeordneten Vorgehensweise, die die Zielstellungen aus normativer Unternehmensebene abbildet und bis in die Entwicklungstätigkeiten herunterbricht. Damit ließe sich auch die von Asimow beschriebene Synthese umsetzen (vgl. Kapitel 2.1, Asimow 1962, S.3ff.).

Die wichtigsten Anforderungen an eine praxisorientierte Vorgehensweise zum Entwickeln nachhaltiger Produkte können wiederum in Anlehnung an Endris et al. wie folgt definiert werden: Die Vorgehensweise muss einfach zu implementieren und für den Nutzer einfach zu erlernen sein. Ferner muss sie exakte Ergebnisse bereitstellen. Dazu sollen so wenig wie mögliche Informationen und informationstechnische Artefakte verwendet werden. Zur Bewertung und Entscheidungsfindung soll der Ressourceneinsatz und Abstimmungsbedarf zwischen den verschiedenen Stakeholdern in Entwicklungsprozess und Lebenszyklus gering gehalten werden (Endris et al. 2011).

Ein Handlungsbedarf kann demgemäß auf allen Ebenen der Produktentwicklung identifiziert werden und betrifft somit:

- I. Prozess und Organisation,
- II. Entwicklungsaktivitäten und -methoden,
- III. Informationstechnologien und Werkzeuge sowie
- IV. Informationsartefakte und -standards.

6.2 Detaillierung der Forschungsfragen

Anhand des Handlungsbedarfs, der sich aus der Analyse des theoretischen Rahmenkonzeptes (Kapitel 2), dem Stand der Technik (Kapitel 3) und der Studie zum Lebenszyklusdenken und -handeln in der industriellen Praxis (Kapitel 5) ergibt, lassen sich die Forschungsfragen (Kapitel 4) wie folgt detaillieren.

1. Prozess und Organisation: Wie müssen Nachhaltigkeitsforderungen im Unternehmen kommuniziert werden und wie werden diese an Verantwortliche in der Produktentwicklung herangetragen?
 - Nachhaltigkeit muss in bestehende Vorgehensweisen von Unternehmen integriert werden, ohne deren Geschäfts- und Entwicklungsprozesse grundlegend zu verändern.
 - Konkrete Nachhaltigkeitsforderungen und -ziele müssen durchgängig für alle Unternehmensebenen sichtbar werden, damit diese von den verschiedenen Stakeholdern verstanden und umgesetzt werden.
2. Entwicklungsaktivitäten und -methoden: Welche Aktivitäten werden durchgeführt und welche Methoden benötigen Entwicklungsingenieure, um nachhaltige Entscheidungen treffen zu können?

- Aus bestehenden Entwicklungsmethoden müssen praxistaugliche Entwicklungsmethoden eruiert, weiterentwickelt und validiert werden, damit das unternehmerische Risiko beim Einsatz reduziert wird.
 - Die methodische Unterstützung des operativen Entwicklungsprozesses muss produktspezifisch angepasst werden können, um Entscheidungen für den Lebenszyklus adäquat treffen zu können.
3. Informationstechnologien und Werkzeuge: Welche Informationstechnologien und Werkzeuge können in welchem Zusammenhang die Produktentwicklungsaktivitäten unterstützen?
- Lösungsansätze des Lebenszyklusdenkens und -managements müssen in bestehende informationstechnische Systemlandschaften von Unternehmen integriert werden.
 - Die informationstechnischen Systeme müssen so erweitert bzw. angepasst werden, dass damit verschiedene Produktalternativen bewerten werden können, detaillierte Abschätzungen auf die Nachhaltigkeit des Produktes erlaubt werden und zur Entscheidungsfindung beigetragen wird.
4. Informationsartefakte und -standards: Welche Informationsartefakte und -standards müssen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte erstellt werden und wie können (Nachhaltigkeits-) Informationen sinnvoll vernetzt werden?
- Es müssen informationstechnische Artefakte (weiter-) entwickelt werden, die lebenszyklusorientierte Nachhaltigkeitsinformationen zu Produkten und Prozessen beinhalten.
 - Die informationstechnischen Artefakte müssen untereinander und mit den verschiedenen Produktmodellen, die im Entwicklungsprozess entstehen, verknüpft werden können.

Prozess und Organisation, Entwicklungsaktivitäten und -methoden, Informationstechnologien und Werkzeuge sowie Informationsartefakte und -standards stellen einen zusammenhängenden Kontext dar, über den ein wesentlicher Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Produkte, und damit zum Umsetzen des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung, geleistet werden kann. Die Lösungen, die für die vier Ebenen bereitgestellt werden, müssen deshalb integrativ sein.

7 Konzept für eine neue Entwicklungsvorgehensweise

Auf der Grundlage des Stands der Technik (Kapitel 3) einerseits und des identifizierten Forschungs- und Handlungsbedarfs (Kapitel 4, Kapitel 6) andererseits wird im Folgenden ein Konzept für eine neue Vorgehensweise zur Entwicklung nachhaltiger Produkte dargestellt.

7.1 Betrachtungshorizont

Das Konzept soll Produktentwicklern ihren Einfluss auf die Nachhaltigkeit ihrer Produkte verdeutlichen und sie auf diese Weise dazu befähigen, einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung zu leisten.



Abbildung 47: Betrachtungshorizont des Konzeptes (vgl. Abbildung 38)

Den Ausgangspunkt für die Festlegung des Konzeptes bildet das Lebenszyklusdenken und -handeln auf der normativen Ebene von Unternehmen. Das lebenszyklusorientierte Handeln innerhalb von Unternehmen gründet auf den nachhaltigen Grundsätzen und Prinzipien in den Unternehmensleitbildern und -philosophien. Auf der strategischen Ebene werden diese Grundsätze und Prinzipien in die Gestaltung von Aufbau- und Ablauforganisation des Unternehmens integriert. Hierbei besteht die Möglichkeit, unternehmensstrategische Gremien und Organisationseinheiten mit nachhaltigkeitsverantwortlichen Personen zu besetzen. Die wohl zentrale Herausforderung für Unternehmen liegt auf der operativen Ebene. Hier müssen im

Rahmen der Durchführung, Steuerung und Kontrolle von Entwicklungsprojekten Entwicklungstätigkeiten auf die übergeordneten Nachhaltigkeitsforderungen abgestimmt und in Einklang mit Methoden und Handlungsanweisungen gebracht werden. Dazu ist es nötig, das Zusammenspiel zwischen Nachhaltigkeitsbeeinflussung und -beurteilung in der operativen Produktentwicklung tatsächlich zu leben. Vor diesem Hintergrund bildet das Ineinandergreifen von Prozess und Organisation, Entwicklungsaktivitäten und -methoden, Informationstechnologien und Werkzeuge sowie Informationsartefakte und -standards den Betrachtungshorizont des Konzeptes (siehe Abbildung 47).

7.2 Prozess und Organisation

In Unternehmen werden Entwicklungsprozesse über Metriken gesteuert, wie insbesondere das magische Dreieck, bestehend aus den Parametern Zeit, Kosten und Qualität, deutlich macht. Die Messung und Auswertung der Parameter zu verschiedenen Zeitpunkten (Meilensteinen) im Entwicklungsprozess gibt dabei an, wie „gut“ das aktuelle Produktentwicklungsprojekt verläuft. Während über den Parameter Kosten eine Kostenbeurteilung des aktuellen Projektes erfolgt, drückt der Parameter Qualität den Entwicklungsfortschritt der einzelnen Gewerke und des gesamten Produktes aus. Wird zu den Meilensteinen jeweils ein Nachweis über das Einhalten des betreffenden Meilensteinziels eingefordert, kann anhand des Parameters Qualität über den zeitlichen Verlauf eines Entwicklungsprojektes der Entwicklungsfortschritt geprüft, und der Entwicklungsprozess gesteuert werden.

So wie Kosten, Zeit und Qualität im Entwicklungsprozess über Metriken bewertet und gesteuert werden können, muss es auch möglich sein, Nachhaltigkeitsforderungen im Entwicklungsprojekt einer Analyse, Einschätzung und Steuerung zu unterziehen. Wie Nachhaltigkeitsforderungen im Entwicklungsprozess grundsätzlich umgesetzt und berücksichtigt werden können, lässt sich anhand von zwei verschiedenen Vorgehensweisen beschreiben:

1. Die gesteuerte Vorgehensweise: Über das Einfordern von Nachweisen, dass Nachhaltigkeitsforderungen zu bestimmten Meilensteinen eingehalten wurden, wird der Entwicklungsfortschritt gesteuert. Der Entwickler nutzt also Methoden und Werkzeugen zur Bewertung der erzielten Lösung.
2. Die angeleitete Vorgehensweise: Der Entwicklungsfortschritt wird über Prozesse, die durch Methoden und Werkzeuge unterstützt werden, geführt, d.h. der Entwickler wird über den gezielten Einsatz von Methoden und Werkzeugen darin angeleitet, seinen Lösungsraum hinsichtlich nachhaltiger Entwicklungsprinzipien einzuschränken.

Idealerweise wird ein Entwicklungsprojekt sowohl gesteuert als auch angeleitet, d.h. es werden zu bestimmten Meilensteinen Nachweise dafür erbracht, dass Zielvorgaben eingehalten werden; gleichzeitig kommt zwischen den Meilensteinen eine angeleitete Vorgehensweise zum Einsatz. Das Zusammenwirken von gesteuerten und angeleiteten Entwicklungsprozessen zeigt Abbildung 48 beispielhaft auf.

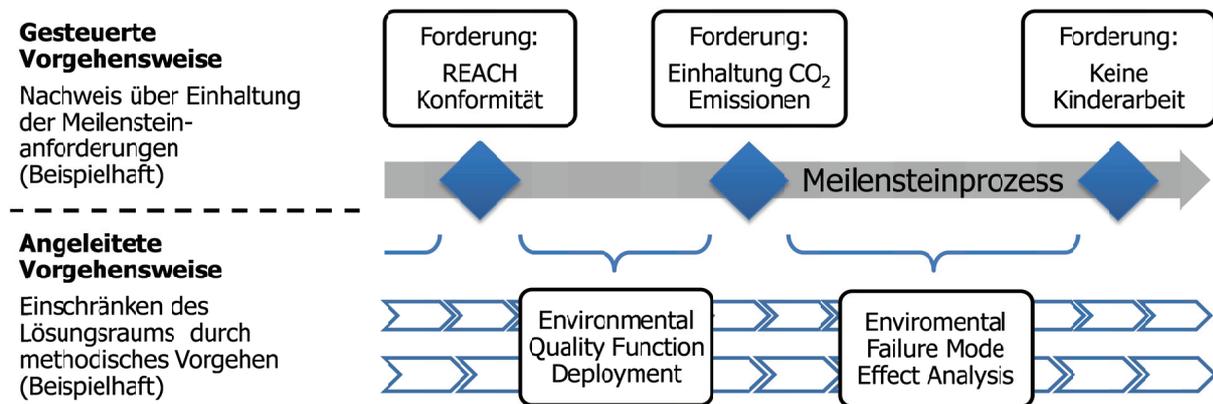


Abbildung 48: Zusammenwirken von gesteuerten und angeleiteten Vorgehensweisen in Entwicklungsprojekten

7.3 Entwicklungsaktivitäten und -methoden

In der Literatur gibt es zahlreiche unterschiedlichen Klassifizierungen und Kategorisierungen von existierenden Methoden und Werkzeugen, die den Grundgedanken vom Lebenszyklusdenken in der Produktentwicklung aufgreifen. Bovea und Pérez-Belis klassifizieren existierende Methoden beispielsweise in qualitative, semi-qualitative und quantitative Methoden und Werkzeugen zur Bewertung der Nachhaltigkeit (Bovea und Pérez-Belis 2012), Baumann et al. kategorisieren Methoden und Werkzeuge grundsätzlich in Checklisten, Richtlinien, analytische Werkzeuge und integrierte Softwaresysteme (Baumann et al. 2002). Es ist jedoch festzuhalten, dass es bisher kein Kategorisierungs- oder Klassifikationsprinzip gibt, das die Auswahl der am vielversprechendsten Methoden und Werkzeuge erlaubt und unterstützt (Bovea und Pérez-Belis 2012). Eine adäquate Methoden- und Werkzeugauswahl hängt hauptsächlich von zwei Parametern ab: von der Zielstellung der Entwicklungsaufgabe sowie vom Fortschritt des Entwicklungsprozesses. Beide Parameter werden über die Nachhaltigkeitsforderungen zu Meilensteinen im Entwicklungsprojekt gesteuert.

Entwicklungsaktivitäten zur Anwendung von Methoden machen es wiederum notwendig, dass Produktentwickler vor dem Methodeneinsatz auf die folgenden Fragen Antworten finden:

- (1) Was soll als Ergebnis erzielt werden?
- (2) Wann im Entwicklungsprozess soll die Entwicklungsmethode eingesetzt werden?

(3) Wie soll eine Nachhaltigkeitsbeurteilung erreicht werden?

(4) Wen adressiert die Entwicklungsmethode?

Im Folgenden wird auf die Fragen näher eingegangen.

(1) Was soll als Ergebnis erzielt werden?

Die Reichweite von Entwicklungsmethoden und der informationstechnischen Unterstützung erstreckt sich von Einzelteil- und Systembewertungen über den Einbezug der Supply-Chain (z.B. Vorprozessketten) bis zur Planung nachgelagerter Lebenszyklusphasen (z.B. das Land, in dem das Produkt genutzt wird). Entwicklungsmethoden unterstützen je nach Nachhaltigkeitsziel die Produktentwicklung. Wird beispielsweise eine Richtlinienkonformität erwartet, kann eine Checkliste eingesetzt werden; wird dagegen ein CO₂-Wert benötigt, muss eine Ökobilanzierung in einem festgelegten Betrachtungsrahmen (Systemgrenzen) durchgeführt werden. Der Methodeneinsatz muss immer zweckgemäß sein. Hierfür ist es entscheidend, ob ein bereits existierendes Produkt bzw. ein etablierter Prozess verbessert oder ob ein neues Produkt bzw. ein neuer Prozess entwickelt werden soll.

(2) Wann im Entwicklungsprozess soll die Entwicklungsmethode eingesetzt werden?

Entscheidend für die Aussagekraft über die Nachhaltigkeit eines Produktes ist der Zeitpunkt der Bewertung im Entwicklungsprozess. Grundsätzlich gilt, dass die Beurteilungsfähigkeit der Nachhaltigkeit mit zunehmendem Entwicklungsfortschritt zunimmt. Somit müssen die Entwicklungsmethoden in die jeweilige Phase des Entwicklungsprozesses – Produktplanung, Entwerfen, Ausarbeiten, Testen, Fertigungsplanung – passen.

(3) Wie soll eine Nachhaltigkeitsbeurteilung erreicht werden?

Eine Nachhaltigkeitsbeurteilung kann in Abhängigkeit von der Zielstellung entweder quantitativ, semi-quantitativ oder qualitativ erfolgen. Zu den quantitativen Vorgehensweisen gehören analytische Werkzeuge wie die Ökobilanzierung (LCA); zu den semi-quantitativen zählen u.a. Methoden und Werkzeuge, die eine qualitative Einschätzung auf Basis von hinterlegten Werten quantifizieren und so ein Ergebnis ausgeben (z.B. Vergleiche). Qualitative Methoden umfassen beispielsweise Einschätzungen verschiedener Konstruktionsalternativen auf der Basis von Erfahrungswerten oder die Bearbeitung von Checklisten während der Konstruktion des Produktes.

(4) Wen adressiert die Entwicklungsmethode?

Entscheidend ist, wer dazu befähigt werden soll, ein nachhaltiges Produkt zu entwickeln oder einen Konstruktionsstand hinsichtlich seiner Nachhaltigkeit zu bewerten. Zu den möglichen Adressaten zählen Experten aus den Bereichen Entwicklung, Konstruktion, Nachhaltigkeits-

bewertung und Fertigungsplanung sowie weitere Fach- und Führungskräfte. Die Methoden variieren sowohl in der Zielgruppe der Anwender als auch im Detaillierungsgrad der Anwendung, wie in Kapitel 3.1 aufgezeigt wurde.

Für die Wissensverarbeitung und informationstechnische Unterstützung ist eine Taxonomie der existierenden Entwicklungsmethoden notwendig. Über die Taxonomie können in informationstechnischen Systemen geeignete Methoden identifiziert und ausgewählt werden. In der Literatur existieren zahlreiche Ansätze für Taxonomien (vgl. Lagerstedt 2003, S. 35ff., Buchert et al. 2014). Auf Basis der Literatur und der oben dargestellten Fragen, lassen sich im Rahmen dieser Arbeit folgende Kategorien für eine Taxonomie ableiten: Zweck, Zeitpunkt, Lebenszyklusphase, Nachhaltigkeitsdimension, Datenverarbeitung, Funktion und Anwender. Die möglichen Ausprägungen sind in Tabelle 7 festgehalten.

Zweck	Zeitpunkt	Lebenszyklusphase	Nachhaltigkeitsdimension	Datenverarbeitung	Funktion	Anwender
Produktneuentwicklung	Produktplanungsphase	Vorprozessketten	Ökologisch	Qualitativ	Produkt	Produktverantwortlicher
Produktverbesserung	Konzeptphase	Fertigung	Ökonomisch	Quantitativ	Prozess	Konstrukteur
Prozessverbesserung	Entwurfsphase	Vertrieb	Sozial	Semi-Quantitativ	Anforderung	Nachhaltigkeitsbewerter
	Ausarbeitungsphase	Nutzung			Dienstleistung	Fertigungsplaner
	Arbeitsvorbereitung	End-of-Life				

Tabelle 7: Taxonomie für Entwicklungsmethoden mit Bezug zur Nachhaltigkeit

In Abhängigkeit zu den oben beschriebenen Fragen können zudem Entwicklungsmethoden in einer Taxonomie festgehalten werden. Über diese Taxonomie können dann für den jeweiligen Anwendungsfall geeignete Methoden identifiziert werden. Aus der Vielzahl an existierenden Methoden (vgl. Kapitel 3) werden im Folgenden drei Methoden exemplarisch aufgegriffen und kategorisiert (Tabelle 8).

Kategorie	Ökobilanz, LCA (Guinée et al. 2011)	ProdTect (Herrmann et al. 2006a)	Design for Sustainability, D4S (Cruel und Diehl 2009)
Zweck	Produktverbesserung	Produkt- und Prozessverbesserung	Produktneuentwicklung und -verbesserung
Zeitpunkt	Konzept und Ausarbeitung	Entwurf und Ausarbeitung	Planung, Konzept und Entwurf
Lebenszyklusphase	Alle	End-of-Life	Alle
Nachhaltigkeitsdimension	Ökologisch	Ökologisch und Ökonomisch	Ökonomisch, Ökologisch und Sozial
Datenverarbeitung	Quantitativ	Quantitativ	Qualitativ
Funktion	Prozess	Produkt und Prozess	Produkt und Anforderung
Anwender	Nachhaltigkeitsbewerter	Produktverantwortlicher und Konstrukteur	Produktverantwortlicher und Konstrukteur

Tabelle 8: Exemplarische Kategorisierung von Entwicklungsmethoden in einer Taxonomie

7.4 Informationstechnologien und Werkzeuge

Die Wissensmodellierung (Knowledge Engineering) dient der Abbildung von Wissen in wissensbasierten Systemen. Sie bildet ein Teilgebiet des Wissensmanagements und der künstlichen Intelligenz. Zur Modellierung von Wissen sind folgende Aufgaben zu bewältigen (Schreiber et al. 2000):

- Erfassung und Strukturierung von explizitem und implizitem Wissen (z.B. Wissensakquise, Wissensanalyse)
- Formalisierung und Abbildung in informationstechnischen Systemen (z.B. Aufbau einer Wissensdatenbank, Wissensrepräsentation)
- Darstellung des Wissens (z.B. Visualisierung, Verknüpfung)

In der Virtuellen Produktentstehung wird für die Modellierung von Wissen eine Vielzahl von informationstechnischen Systemen über den gesamten Produktentstehungsprozess angeboten. Hierbei verfolgt die Virtuelle Produktentstehung das Ziel einer vollständigen Digitalisierung des Produktentstehungsprozesses, von der Produktplanung über die Konstruktion und Validierung anhand von Simulationen bis hin zur Fertigungsplanung und Virtuellen Inbetriebnahme (Stark et al. 2015). Diese umfassende Digitalisierung erlaubt effizientes Product Lifecycle Management (PLM) (Niemann et al. 2009, S. 249). Informatiostechnische Systeme, die

PLM unterstützen, integrieren Prozesse, Methoden und Wissen der Produktentstehung (Abramovici et al. 2010, S. 48) und bilden den kompletten Produktlebenszyklus digital ab (Theurer et al. 2010, S. 33ff.).

Konzeptionell ist ein PLM-System aus einer Daten-, Integrations- und Methoden-/ Werkzeugschicht aufgebaut. Über die Integrationsplattform greifen alle eingesetzten Werkzeuge auf eine gemeinsame Wissens- bzw. Datenbasis zu (Vogel 2006, S. 99). Abbildung 49 illustriert die datenzentrische Betrachtungsweise von PLM-Systemen.

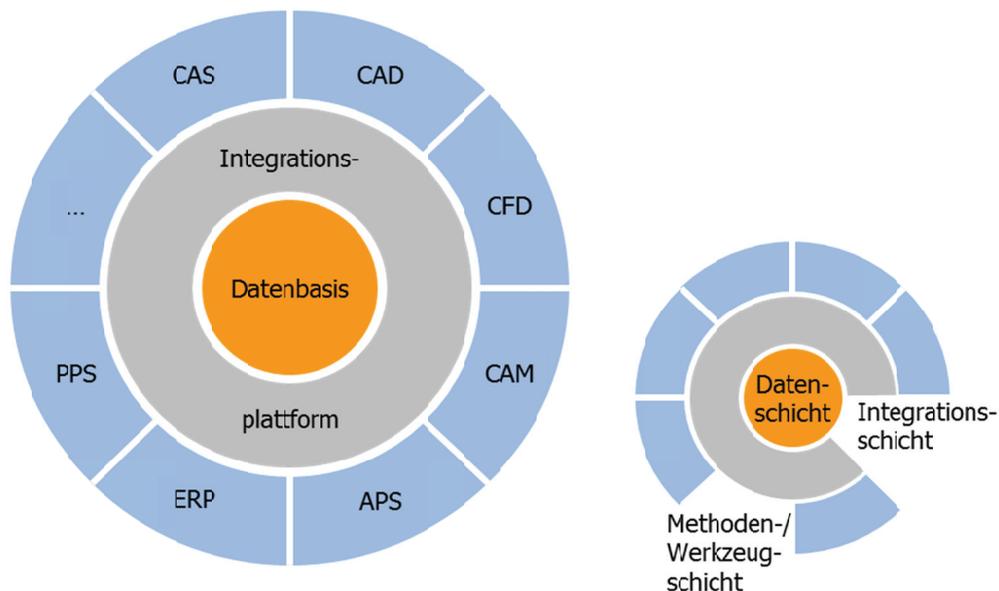


Abbildung 49: Datenzentrische Betrachtungsweise eines PLM-Systems (Vogel 2006)

Das Wissen, das in den Systemen der Methoden-/ Werkzeugschicht abgebildet wird, muss für PLM-Systeme erfasst und strukturiert sowie über die Integrationsschicht formalisiert werden. Über die Formalisierung lässt sich das Wissen in der Datenschicht abbilden. Um dieses Wissen wiederum für andere Werkzeuge und Anwender nutzen zu können, muss es im PLM-System visualisiert und verknüpft werden.

Aus den Erkenntnissen des Stands der Technik (Kapitel 3) und der Studie zum Lebenszyklusdenken und -handeln (Kapitel 5) lässt sich das Entwicklungsvorgehen für nachhaltige Produkte mit systemtechnischer Unterstützung beispielhaft wie folgt skizzieren (Abbildung 50):

1. Über CAID-/CAS-, CAD-, CAE- Systeme u.ä. werden die Geometrie des zukünftigen Produktes sowie dessen Eigenschaften festgelegt (z.B. CAD-Produktmodell) und validiert (z.B. FEM-Simulation). Hierbei werden die Zielvorgaben bezüglich Nachhaltigkeitsforderungen berücksichtigt (z.B. geringes Gewicht).

2. Über PDM- und ERP-Systeme wird das erzeugte Wissen aus dem vorherigen Schritt strukturiert und verwaltet. Darüber hinaus wird das abgelegte um nachhaltigkeitsrelevantes Wissen erweitert (z.B. Fertigungsinformationen).
3. Über spezielle Softwaresysteme wird eine Nachhaltigkeitsbewertung (z.B. GaBi) des Produktes vorgenommen werden. Dafür werden Lebenswegmodelle erstellt und Systemgrenzen definiert. Aus verschiedenen Datenbanken werden anschließend Nachhaltigkeitsinformationen zusammengeführt und das Produkt über seinen Lebensweg bewertet.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das Wissen über das Ergebnis der Bewertung im Software- oder Expertensystem liegt. Im Idealfall kann es über die Integrationsplattform in der Datenbasis des PLM-Systems dargestellt und somit wiederum den anderen Teilsystemen bereitgestellt werden. Über ein iteratives Durchlaufen der oben beschriebenen Schritte kann eine Produktverbesserung hinsichtlich Nachhaltigkeit erzielt werden.



Abbildung 50: Zusammenhänge zwischen Produktentwicklung, Datenmanagement und Nachhaltigkeitsbewertung auf operativer Ebene

Die Integration von Wissen und Daten erfolgt dabei über native oder speziell entwickelte Schnittstellen zwischen den verschiedenen Systemen und über standardisierte Datenaustauschformate. Dabei ist die Durchgängigkeit von Wissen und Daten nicht per se gegeben (Stark und Stöckert 2009)¹⁹.

¹⁹ Auf Möglichkeiten zur Integration auf IT-Systemebene wird in Kapitel 3.2 eingegangen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die dargelegte Vorgehensweise einen Lösungsansatz in Bezug auf die Frage darstellt, wie Lebenszyklusdenken und -management auf Ebene der Informationstechnologien und Werkzeuge integriert werden können. Die zentrale Datenbasis eines PLM-Systems spielt dabei eine besondere Rolle. Über sie kann produkt-, prozess- und lebenszyklusbezogenes Wissen strukturiert abgebildet werden. Die automatisierte Übergabe von Wissen an Teilsysteme erfolgt über eine Integrationsschicht. Ferner kann neues Wissen in Teilsystemen generiert werden.

7.5 Informationsartefakte und -standards

Zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten in der Entwicklung technischer Produkte werden Informationsartefakte benötigt, die produkt-, prozess- und lebenszyklusbezogenes Wissen beinhalten. Die Artefakte werden in der Wissensbasis eines PLM-Systems abgebildet. Sie erlauben einerseits den Teilsystemen des PLM-Systems die Nutzung des Wissens (Wissensverarbeitung). Andererseits können die Artefakte durch gezielte Verknüpfungen zu einer Generierung von Wissen beitragen. Da die Artefakte vorrangig auf Nachhaltigkeitsaspekte in der Produktentwicklung ausgerichtet sind, werden sie im Folgenden als Sustainability Information Objects (SIO) bezeichnet.

Vorgehensweise zur Definition von Sustainability Information Objects

Die SIO der vorliegenden Arbeit basieren auf zwei Analysen: Es wurden erstens offiziell anerkannte Nachhaltigkeitsindikatoren dahingehend analysiert, ob Produkte bzw. die Produktentwicklung einen direkten Einfluss darauf nehmen kann; zweitens wurden Methoden und Werkzeuge exemplarisch auf eine Produktentwicklung angewandt, um maßgebliche Nachhaltigkeitsinformationen zu identifizieren. Über eine anschließende Clusteranalyse konnten sieben Klassen von SIO identifiziert werden. Den Klassen lassen sich in Form von SIO instanzieren. Eine Übersicht der Vorgehensweise ist in Abbildung 51 dargestellt.

Analyse von offiziellen Nachhaltigkeitsindikatoren

Zur Analyse von offiziellen Nachhaltigkeitsindikatoren wurde die Datenbank des Nationalen Instituts für Umweltforschung (NIES) in Japan durchsucht. Die Datenbank umfasst 1848 anerkannte Nachhaltigkeitsindikatoren von nationalen Regierungen und internationalen Organisationen aus dem Zeitraum von 2006 bis 2008 (NIES 2011); Abfragen können über eine Internet-Suchmaschine durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit gelang es mithilfe der Datenbank, 31 Nachhaltigkeitsindikatoren zu identifizieren, die sowohl direkt als auch indirekt in den Zusammenhang mit dem Entwicklungsprozess für Produkte gebracht werden

können. Diese Indikatoren lassen sich den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit zuordnen. Eine Auswahl von Indikatoren ist in Tabelle 9 dargestellt; die vollständige Liste ist in Anhang V zu finden. (vgl. Inoue et al. 2012)

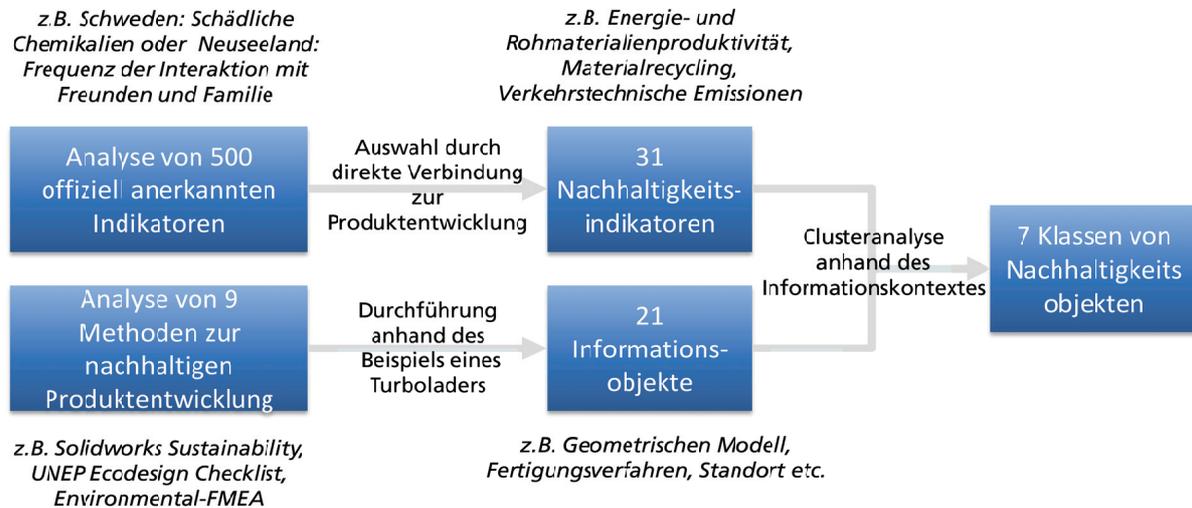


Abbildung 51: Vorgehensweise zur Identifikation der Objektklassen

Category	Subcategory	Indicator	Country	Year
Ecological	Chemicals	Hazardous chemicals, quantity	Sweden	2006
Ecological	Resources	Use of renewable energy sources	Finland	2006
Economical	Material use	Energy and raw materials productivity	Germany	2002
Economical	Transportation	External costs of transport	Austria	2002
Economical	Eco-performance	Labour productivity	Australia	2006
Social	Health	Satisfaction with health	Germany	2002

Tabelle 9: Auswahl von Nachhaltigkeitsindikatoren mit Bezug zur Produktentwicklung (vollständige Liste siehe Anhang V)

Analyse von angewandten Nachhaltigkeitsindikatoren

Im Laufe der Produktentwicklung werden in prozessualen und methodischen Aktivitäten vielfältige Informationen generiert und weiterverarbeitet. Die Bedeutung dieser Informationen wird von Dörner (nach Pahl et al. 2005, S. 65ff.) unterstrichen. Er beschreibt neue Lösungen in der Produktentwicklung als das direkte Resultat der Kombination und Interpretation von vorhandenen Informationen. Den Vorgang der Kombination und Interpretation bezeichnet Dörner als Informationsverarbeitung (nach Pahl et al. 2005, S. 65ff.). Wilhelm schlägt darüber hinaus vor, die im Rahmen der Informationsverarbeitung betrachteten Informationsin-

puts und -outputs der verschiedenen Aktivitäten in Form von Informationsobjekten zu repräsentieren (Wilhelm 2007, S. 215).

Zur Identifikation von maßgeblichen Nachhaltigkeitsinformationen in der Produktentwicklung wurden Methoden und Werkzeuge an der Entwicklung eines Produktes beispielhaft angewandt. Es wurden neun ausgewählte Methoden und Werkzeuge (vgl. Kapitel 3.1.2 und 3.2.2) an einem Produktbeispiel (Redesign eines Abgasturboladers) getestet und die entsprechenden Informationsinputs und -outputs festgehalten. Sie finden sich in Buchert et al. 2013 (Buchert et al. 2013). An dieser Stelle wird auf die umfangreiche Arbeit von Buchert et al. nicht näher eingegangen. Die neun Methoden sind in Tabelle 10 abgebildet.

Methode	Art der Methode	Quelle
ECODESIGN PILOT	Checkliste/ Leitlinie	Wimmer und Zust 2003
Ten Golden Rules	Checkliste/ Leitlinie	Luttrupp und Lagerstedt 2006
LiDS-Wheel	Bewertungsmethode	University of Michigan 2013
MET-/ Product Design-/ ERPA-Matrix	Bewertungsmethode	Graedel und Allenby 2003
MECO-Matrix	Analytische Methode	Pommer und Bech 2003
Eco-Value Analyse	Analytische Methode	Oberender und Birkhofer 2004
QFDE/ ECQFD	Analytische Methode	Masui et al. 2003
Umwelt-FMEA	Analytische Methode	Großmann et al. 2008
Simplified LCA	Analytische Methode	Bala et al. 2010

Tabelle 10: Methoden zur Identifikation von maßgeblichen Nachhaltigkeitsinformationen (Buchert et al. 2014)

Die Methoden spiegeln eine hohe Relevanz in der Anwendung wider und wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Verfügbarkeit prozeduraler Informationen,
- Aufwand der Anwendung,
- Quellenanzahl sowie
- Zitationsindex.

Für die Analyse der Informationsinputs und -outputs wurde der Betrachtungsrahmen so gewählt, dass drei verschiedene Entwicklungsprozesse für das gleiche Beispielprodukt mit einem unterschiedlichen Methodeneinsatz durchgeführt werden konnten. Dabei kamen die

neun Methoden zum Redesign eines Abgasturboladers (Garrett GT2860R) zur Anwendung. Die Methoden sind im Begin-of-Life (vgl. Abbildung 18) anzusiedeln. Abbildung 52 zeigt den Betrachtungsrahmen der Produktplanungs-, Konzept- und Entwurfsphase mit den jeweils zugeordneten Methoden. (Buchert et al. 2014)

	Planungsphase	Konzeptphase	Entwurfsphase
Beispielprozess 1	Simplified LCA	LiDS-Wheel	Eco-Value Analysis
Beispielprozess 2	Ten Golden Rules	ERPA-Matrix	Umwelt-FMEA
Beispielprozess 3	ECODESIGN Pilot	MECO-Matrix	QFDE

Abbildung 52: Betrachtungsrahmen zur Analyse von Informationsinputs und -outputs in Entwicklungsaktivitäten (nach Buchert et al. 2014)

In Bezug auf die zentralen Informationsinputs und -outputs können folgende Erkenntnisse festgehalten werden (Buchert et al. 2013):

- Informationsinputs und -outputs sind abhängig vom Bezugsobjekt der Methode (Produktplanung, Konzept, Entwurf).
- Die größten Überschneidungen bei den Inputs ergeben sich bei den Informationen, die eine ökologische Perspektive auf den Lebenszyklus des Produktes darstellen (z.B. Energieverbrauch in der Nutzungsphase).
- Methodenoutputs erlauben einen variierenden Interpretationsspielraum in Abhängigkeit davon, ob sie als Indikatoren, Bewertungstabellen, Handlungsempfehlungen oder als semi-quantitatives Bewertungsergebnis vorliegen.

Nachdem die Informationsinputs und -outputs der Methoden zusammengetragen und begrifflich vereinheitlicht wurden, wurden Informationsobjekte gebildet. Dabei ließ sich beobachten, dass die auf eine Lebenszyklusphase (z.B. Nutzung, EoL) fokussierten Informationen, beispielsweise in der Entstehung während einer bestimmten Aktivität (z.B. Analyse, Bewertung) oder bezüglich eines bestimmten Dokuments (z.B. Anforderungsliste, CAD-Modell), inhaltlich zueinander in Beziehung stehen. So konnten z.B. die Informationen über die Anzahl der Fertigungsschritte und der Energieverbrauch in Fertigung und Montage demselben Informationsobjekt zugeordnet werden. Auf diese Weise war eine Verdichtung der Informationen möglich. Auf das Verdichten der Informationen folgte schließlich die Festlegung geeigneter Bezeichnungen für die Informationsobjekte. Die Bezeichnungen spiegeln die charakteris-

tischen Eigenschaften der dem jeweiligen Informationsobjekt zugeordneten Informationen wider (z.B. Fertigungsprozesse). Für die vorliegende Untersuchung ließen sich die Informationen zu 27 Informationsobjekten zusammenfassen. Die vollständige Übersicht der Informationsobjekte ist in Anhang VI zu finden; Tabelle 11 zeigt eine Auswahl ohne Zuordnung von Klassen. (Buchert et al. 2013)

Auswahl von Informationsobjekten (ohne Zuordnung einer Klasse)
2D,3D- Feingestalt
Anforderungsliste
Liste im Produkt enthaltener umweltgefährdender Stoffe
Kostenschätzung
Produktstruktur
EOL-Szenario
Fertigungs- und Montageunterlagen
Konzept der Nutzungsphase
Materialunterlagen
Produktnutzungsverhalten

Tabelle 11: Beispielhafte Auswahl von Informationsobjekten (nach Buchert et al. 2013)

Bezüglich der Informationsobjekte können folgende Erkenntnisse festgehalten werden:

- Verschiedene Methoden greifen teils auf dieselben, teils auf unterschiedliche Informationen entlang des Entwicklungsprozesses zurück. Durch diese Unterschiede variieren einerseits Anforderungen, andererseits werden in der Phase der Konzeptauswahl sowie in der Entwurfsphase unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt.
- Bei einem Vergleich der Informationsobjekte überwiegen die Objekte mit Bezug zu den einzelnen Phasen des Produktlebenszykluses (Lebenszyklusdenken).
- In den frühen Phasen der Produktentstehung bestehen Synergieeffekte bei der Informationsverarbeitung: Informationsobjekte weisen hierbei die meisten Übereinstimmungen auf. Mit zunehmendem Entwicklungsfortschritt nehmen die Übereinstimmungen ab.

Identifikation von Sustainability Information Objects

Über eine anschließende Clusteranalyse konnten die relevanten Nachhaltigkeitsindikatoren und die identifizierten Informationsobjekte zu Sustainable Information Objects (SIO) zusammengeführt werden.

In der Clusteranalyse wurden auf qualitativer Ebene Ähnlichkeiten von identifizierten Informationsobjekten aus offiziell anerkannten Nachhaltigkeitsindikatoren und aus der exemplarischen Anwendung von existierenden Methoden identifiziert. Aus Informationen mit ähnlichen Inhalten wurden Cluster gebildet. Diese bilden die Klassen der SIO. Die eigentlichen Informationen sind dann Instanziierungen der Klassen (siehe Abbildung 53).

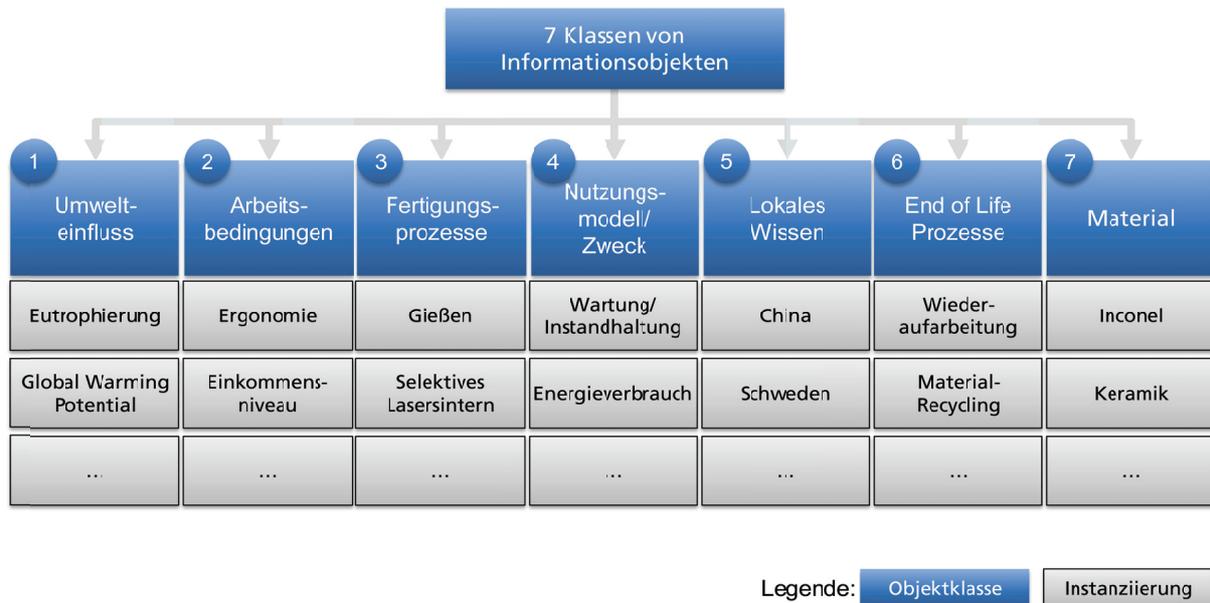


Abbildung 53: Sustainable Information Objects - Objektclassen und beispielhafte Instanziierungen

Die SIO bestehen aus sieben Objektclassen mit entsprechenden Instanziierungen. Sie beinhalten das produkt-, prozess- und lebenszyklusbezogenes Wissen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte, und sie weisen außerdem die vier im Kontext von PLM-Systemen geforderten Dimensionen der Informationsqualität auf, d.h. sie sind systemunterstützt, inhärent, darstellungsbezogen und zweckabhängig. Die SIO können die Wissensbasis in einem PLM-System bilden und zugleich Grundlage für die Anwendung von SysLM und LML sein (vgl. Kapitel 3.2).

7.6 Neue Entwicklungsvorgehensweise

In den vorangegangenen Kapiteln wurde auf die Ebenen Prozess und Organisation, Entwicklungsaktivitäten und -methoden, Informationstechnologien und Werkzeuge sowie Informationsartefakte spezifisch eingegangen und die jeweilige Lösung zur Entwicklung nachhaltiger Produkte herausgearbeitet. Ein Gesamtkonzept muss allerdings auch abbilden, wie Entwicklungsingenieure zukünftig arbeiten sollen. Auf der strategischen Ebene ist deshalb die Generierung einer neuen Entwicklungsvorgehensweise erforderlich. Im Folgenden wird dargelegt, wie sich der allgemeine Lösungsprozess von Konstruktion und virtueller Entwicklung verändern muss. Abschließend wird das neue Entwicklungsvorgehen beschrieben.

Der allgemeine Lösungsprozess in der Konstruktion und Entwicklung von Produkten unterliegt dem Vorgang der Analyse und einem anschließenden Vorgang der Synthese. Dazwischen laufen Arbeits- und Entscheidungsschritte ab (Pahl et al. 2007, S. 17f. und S. 189). Die Arbeitsschritte können sich am systemtechnischen Vorgehen nach Haberfaellner und Daenzer orientieren und finden sich in den drei Phasen Zielsuche, Lösungssuche und Auswahl (siehe Abbildung 54) wieder (Haberfaellner und Daenzer 2002, S. 98).

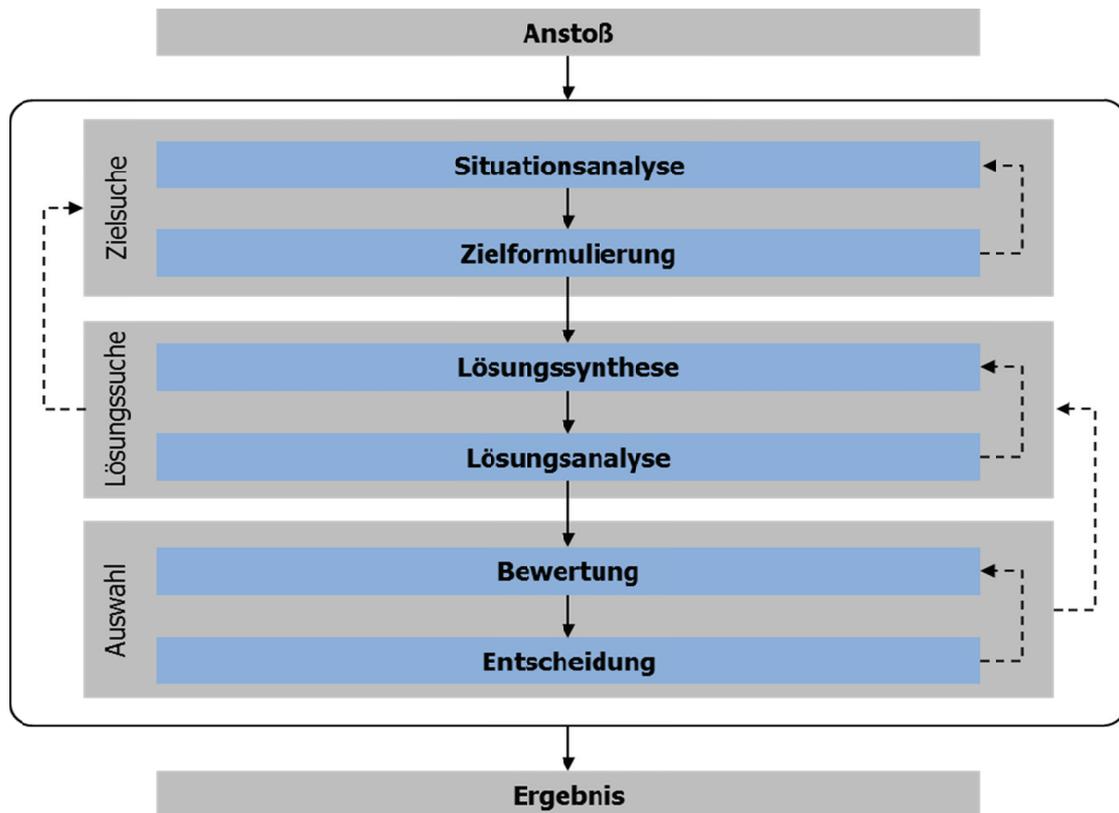


Abbildung 54: Allgemeiner Problemlösungsprozess (nach Haberfaellner und Daenzer 2002, S. 98)

Abbildung 54 stellt die drei Phasen und Schritte des allgemeinen Problemlösungsprozesses dar. In einem systemtechnischen Vorgehensmodell wiederholen sich die einzelnen Schritte, so dass das System bzw. Produkt über die Zeit vom abstrakten zum konkreten Produkt entwickelt wird.

Aus Sicht der Virtuellen Produktentstehung lässt sich der allgemeine Problemlösungsprozess weiter konkretisieren. Stark definiert dafür das so genannte Regelungsmodell der Virtuellen Produktentstehung, das in Abbildung 55 dargestellt ist (Stark et al. 2002).

Die Phasen des allgemeinen Problemlösungsprozesses lassen sich im Regelungsmodell wiederfinden und wie folgt beschreiben:

- Der Anstoß des allgemeinen Problemlösungsprozesses entspricht den Eingangsparametern W des Regelungsmodells. Damit wird der Handlungsrahmen beschrieben, in dem die Entwicklung stattfinden soll (z.B. Lastenheft, Budget, Funktionsprioritäten).
- Die Phase der Zielsuche gliedert sich im Sinne des allgemeinen Problemlösungsprozesses in die Arbeitsschritte der Situationsanalyse und der Zielformulierung. Im Regelungsmodell entspricht die Situationsanalyse der Analyse Handlungsrahmens von Managern und Ingenieuren. die Definition von Konstruktionsvorgaben und die Auslegungsannahmen spiegeln die Zielformulierung wider (Parameter Y).
- Die Phase der Lösungssuche umfasst laut allgemeinem Problemlösungsprozess die Schritte der Lösungssynthese und der Lösungsanalyse. Im Regelungsmodell erfolgt die Lösungssynthese durch den Aufbau und Austausch von virtuellen Produktmodellen mit bspw. CAD-, CAE-, PDM-, DMU-Systemen; die Lösungsanalyse der entwickelten Modelle schließt sich. Beide Schritte unterliegen dabei den Parametern Z des Regelungsmodells, d.h. die Arbeiten benötigen u.a. Wissen, verifizierte Methoden und vereinbarte Vorgehensweisen in der Kommunikation und unterliegen gleichzeitig Randbedingungen wie beispielsweise verfügbarer Software, freigegebenem Budget und angesetzter Entwicklungszeit.
- Die Phase der Auswahl gliedert sich gemäß des allgemeinen Problemlösungsprozesses in die Arbeitsschritte der Bewertung und der Entscheidung. Im Rahmen des Regelungsmodells werden Simulations- und Analyseergebnisse entsprechend für Manager und Ingenieure aufbereitet und von diesen bewertet, so dass eine Entscheidung über die Freigabe getroffen werden kann: Erfüllt das entwickelte Produkt die Vorgaben und Anforderungen, kann es freigegeben werden; erfüllt es sie nicht, muss von Managern und Ingenieuren über die Parameter Y nachgeregelt werden.
- Das Ergebnis des allgemeinen Problemlösungsprozesses entspricht dem Parameter X des Regelungsmodells, einem freigegebenen Produkt.

Wird nun davon ausgegangen, dass die Entwicklung ein nachhaltiges Produkt hervorbringen soll, so müssen sowohl der allgemeine Lösungsprozess als auch das Regelkreismodell der Virtuellen Produktentstehung das Ziel verfolgen, ökologische, soziale und ökonomische Produkteigenschaften zu verbessern, um so das Produkt für den gesamten Lebenszyklus nachhaltig zu gestalten. Beide Modelle zeigen auf, dass der Anstoß bzw. die Eingangsparameter W maßgebend für die Entwicklung sind. Die Bedingungen, die über die Eingangsparameter definiert werden, haben einen Einfluss auf Arbeitsschritte des Lösungsprozesses. Dies bedeutet wiederum, dass Nachhaltigkeitsforderungen zunächst definiert werden müssen, um in der Ziel- und Lösungssuche berücksichtigt werden zu können.

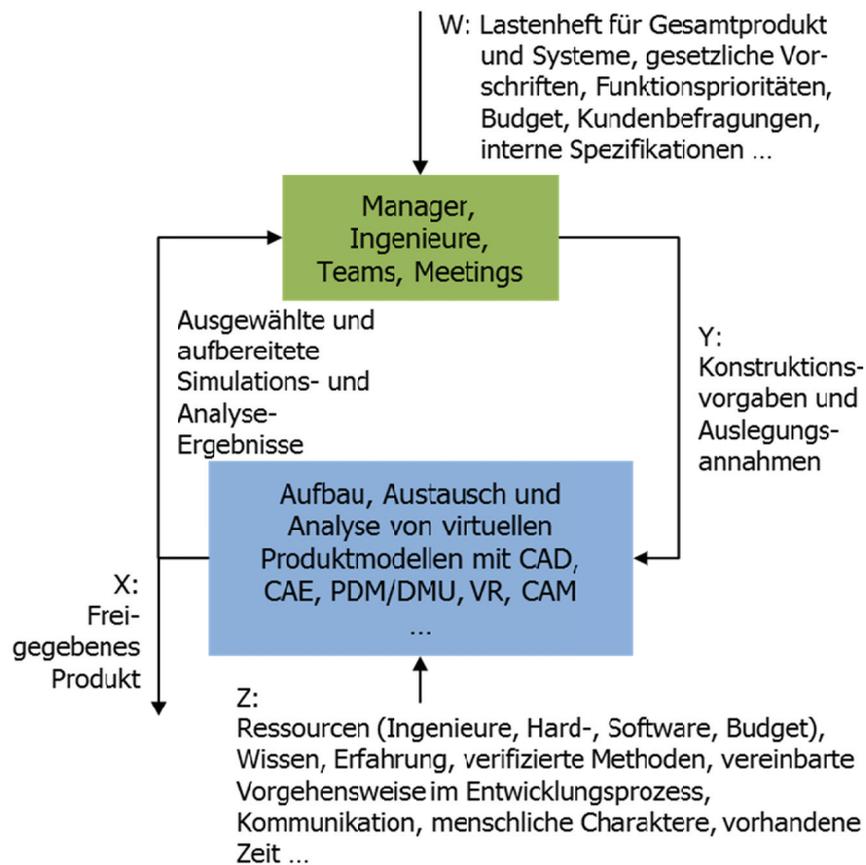


Abbildung 55: Regelungsmodell der Virtuellen Produktentstehung (nach Stark et al. 2002)

In Zusammenhang mit der Ziel- und Lösungssuche stellen Lindahl und Ekermann fest, dass nachhaltige Produktentwicklung nicht ausschließlich auf einer Methode oder einem Werkzeug für die Produktentwicklung basieren kann (Lindahl und Ekermann 2013). Das Regelungsmodell der Virtuellen Produktentstehung bestätigt diese Aussage. Es zeigt auf, dass insbesondere in der Phase der Lösungssuche unter dem Einsatz unterschiedlicher Methoden und informationstechnischer Werkzeuge verschiedene Modelle entwickelt und simuliert werden müssen, um alle Forderungen der Eingangsparameter W zu erfüllen. Dies gilt auch für die sich anschließenden Arbeitsschritte der Aufbereitung und der Bewertung.

Aus dem allgemeinen Problemlösungsprozess, dem Regelkreismodell der Virtuellen Produktentstehung sowie aus den Erkenntnissen der Ebenen Prozess und Organisation, Entwicklungsaktivitäten und -methoden, Informationstechnologien und Werkzeuge und Informationsartefakte und -standards kann ein ideales Entwicklungsvorgehen abgeleitet werden. Die neue Vorgehensweise EnBeKo (Entscheidungs-, Bewertungs- und Konstruktionsregelkreis) ist in Abbildung 56 dargestellt.

Als Anstoß für die Entwicklung wird ein Entwicklungsauftrag ausgelöst, in dem die Produktidee spezifiziert wird. Die Spezifikation wird in Form eines Lastenhefts oder Design Auftrags

festgehalten. Im ersten Schritt des neuen Entwicklungsvorgehens, der Situationsanalyse, müssen die relevanten Nachhaltigkeitsforderungen aus dem Lastenheft identifiziert werden. Dafür wird das Lastenheft auf ökologische, ökonomische und soziale Aspekte untersucht und es werden Zusammenhänge zwischen allen drei Aspekten herausgearbeitet.

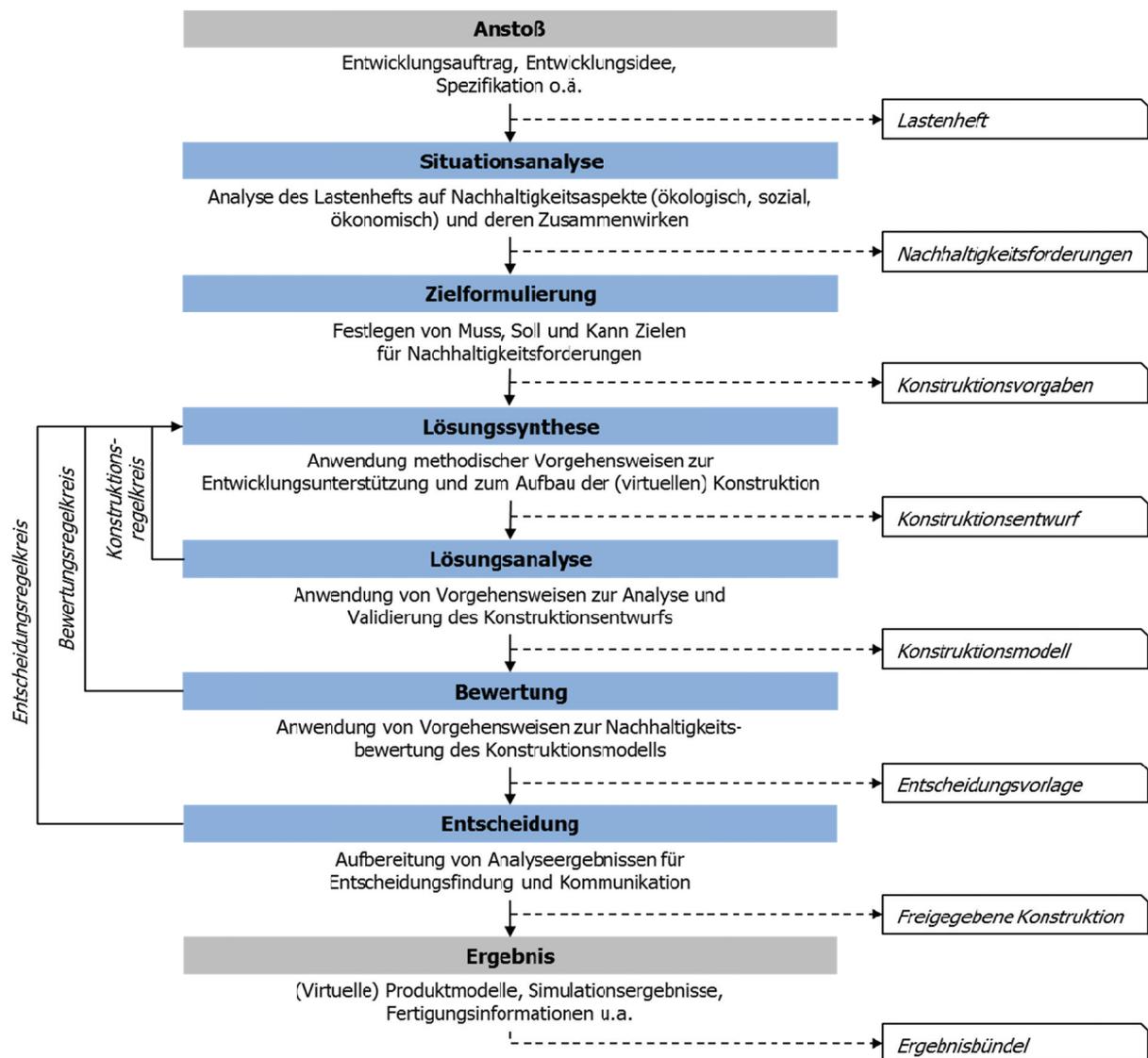


Abbildung 56: EnBeKo - Die veränderte Vorgehensweise mit Entscheidungs-, Bewertungs- und Konstruktionsregelkreis zum Entwickeln nachhaltiger Produkte

Im nächsten Schritt der Zielformulierung werden die Nachhaltigkeitsforderungen in Muss-, Soll- und Kann-Ziele differenziert. Die Ziele bilden die Konstruktionsvorgaben, unter denen eine Lösung entwickelt werden soll, und müssen über den zeitlichen Verlauf des Entwicklungsprozesses in Meilensteinziele eingebettet werden. Im Schritt der Lösungssynthese werden methodische Vorgehensweisen und informationstechnische Systeme zur Unterstützung dieser Vorgehensweisen benötigt, um einen Konstruktionsentwurf zu erstellen. Danach erfolgt der Schritt der Lösungsanalyse: Der Konstruktionsentwurf wird technisch validiert und nachhaltig qualitativ evaluiert. Dabei kommt der Konstruktionsregelkreis zum Tragen: Um

Produktverbesserungen herbeizuführen, wird auf konstruktiver Ebene das Konstruktionsmodell so lange iterativ verbessert, bis die Konstruktionsvorgaben erreicht sind. Im anschließenden Schritt der Bewertung wird das Produktmodell im Kontext seines gesamten Lebenszyklus gesetzt und mit geeigneten Methoden und informationstechnischen Unterstützungen bewertet; das Ergebnis wird in einer Entscheidungsvorlage festgehalten. Hierbei findet der zweite Regelkreis, der Bewertungsregelkreis, Anwendung: Erfüllt das Konstruktionsmodell im Kontext seines Lebenszyklus nicht die Nachhaltigkeitsforderungen, müssen Änderungen am Konstruktionsentwurf und -modell vorgenommen werden. Für den letzten Schritt der Entscheidung werden die Analyseergebnisse für Unternehmensverantwortliche aufbereitet und kommuniziert. Dabei setzt der dritte Regelkreis, der Entscheidungsregelkreis, ein: Stimmen die erzielten Ergebnisse nicht mit den Unternehmenszielen und -vorgaben überein, muss ausgehend vom Schritt der Lösungssynthese nachgebessert werden. Als Ergebnis der gesamten Vorgehensweise liegen alle Informationen vor, die das Produkt in seinem Lebenszykluskontext beschreiben. Sie stellen das sogenannte Ergebnisbündel dar.

8 Machbarkeitsstudie

Mit dem Ziel, die Anwendungsfähigkeit des konzipierten Entwicklungsvorgehens (Kapitel 7) sicherzustellen, wurde das Konzept einer Machbarkeitsstudie unterzogen. Diese Studie wird im Folgenden vorgestellt. Dazu wird zunächst die Durchführung der Studie eingehend begründet und erläutert (Kapitel 8.1) sowie die für die Studie ausgewählte Methode beschrieben (Kapitel 8.2). Im Anschluss werden Nachhaltigkeitsziele exemplarisch über eine ausgewählte Entwicklungsmethode in den Zusammenhang mit technischen Produkthanforderungen gebracht (Kapitel 8.3). Abschließend wird das Ergebnis mit Blick auf die Entwicklung einer anwendungsfähigen Vorgehensweise bewertet (Kapitel 8.4).

8.1 Begründung und Vorgehensweise

Die Anwendungsfähigkeit eines neuen Entwicklungsvorgehens setzt voraus, dass die Vorgehensweise einerseits Entwickler darin unterstützt, verschiedene Produktalternativen miteinander zu vergleichen, und andererseits den Lösungsraum hinsichtlich der Produktmerkmale und -eigenschaften derart einschränkt, dass eine robuste und schnelle Entscheidungsfindung sichergestellt werden kann. Darüber hinaus muss die Vorgehensweise Entscheidungsdimensionen in Bezug auf Konstruktionsparameter aufweisen, die qualitativ und quantitativ mit Nachhaltigkeitsforderungen zusammenhängen.

Um sicherzustellen, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vorgehensweise diese Anforderungen erfüllt, wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt.

Ihren Ursprung haben Machbarkeitsstudien im angelsächsischen Raum. Als „feasibility studies“ oder „proof of concepts“ für das Projektmanagement entwickelt, dienen sie dazu, Projekte vor der eigentlichen Umsetzung auf Risiken zu überprüfen und damit die Erreichbarkeit der Projektziele zu gewährleisten. Zunehmend werden Machbarkeitsstudien aber auch im industriellen Umfeld durchgeführt, insbesondere im Zusammenhang mit Methoden der Produktentwicklung, um eine technische Lösung auf ihre Funktionsweise sowie auf die Wirkung ihrer Eigenschaften hin zu überprüfen. In Analogie zum Projektmanagement wird auf Basis

der gewonnenen Erkenntnisse die weitere Entwicklung ausgelöst oder verworfen. Der letztgenannte Fall führt in der Regel zu einer Änderung des Entwicklungsauftrags.

Im Fokus der vorliegenden Machbarkeitsstudie steht der Nachweis, dass Konstruktionsparameter und Nachhaltigkeitseigenschaften in einem unmittelbaren Zusammenhang stehen. Die Planung und Durchführung der Studie wurden auf den unterschiedlichen Ebenen unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

1. Prozess und Organisation:
 - a. Betrachtung der frühen Phase der Produktentwicklung, weil hier das größte Potential liegt, das Nachhaltigkeitsverhalten des Produktes entlang des Lebenszyklus²⁰ zu beeinflussen.
 - b. Demonstration an einem konkreten Beispielprodukt, um die Ergebnisse besser einschätzen zu können; das Produkt ist eine Baugruppe mit geringer Komplexität in Aufbau und Funktionsweise.
 - c. Ausbeldung organisatorischer Aspekte, weil sie unternehmensspezifisch sind und im Rahmen der Machbarkeitsstudie keine Aussagekraft besäßen.
2. Entwicklungsaktivitäten und -methoden:
 - a. Auswahl einer Entwicklungsmethode, die nicht nur eine Lösung, sondern ein Lösungsspektrum aufzeigt, aus dem eine konstruktive Lösung ausgewählt werden kann; somit kann ausgeschlossen werden, dass die exemplarisch ausgewählte Entwicklungsmethode rein zufällig ein geeignetes Ergebnis erzielt²⁰.
 - b. Bewertung des Produkts anhand weniger, dafür aber allgemein anerkannter, Nachhaltigkeitskriterien bzw. -indikatoren; damit wird die Komplexität der Vorgehensweise reduziert.
3. Informationstechnologien und Werkzeuge:
 - a. Nutzung von existierenden Datenbanken (z.B. GaBi), um den Aufwand für Softwareentwicklungen und -anpassungen gering zu halten.
 - b. Nutzung von existierenden Entwicklungswerkzeugen (z.B. CAD Systeme) und deren verfügbaren Schnittstellen (z.B. Export- und Importfunktionen), um ebenfalls den Aufwand für Softwareentwicklungen und -anpassungen gering zu halten.
4. Informationsartefakte und -standards
 - a. Nutzung von Standardaustauschformaten für den Informationsaustausch zwischen den in 3a genannten informationstechnischen Systemen und Werkzeugen.

²⁰ Ein Entwicklungsingenieur wählt seine Parameter z.B. so, dass die Methode beim Redesign eine bessere Bewertung erhält, nicht wissend, dass es bei anderen Parametern noch besser sein könnte.

- b. Reduzierung der Informationsartefakte und deren Vernetzung untereinander in Analogie zur geringen Produktkomplexität (siehe 3b und 3c).

Für die Machbarkeitsstudie wurde im Bereich der Entwicklungsaktivitäten und -methoden die Methode des Preference-Set based Design (PSD) von Inoue et al. ausgewählt. Die PSD ermöglicht eine flexible und robuste Konstruktion unter Einbezug von Unsicherheiten. Es werden verschiedene Lösungsräume für Konstruktionsparameter als Menge angesehen; über einen Algorithmus werden die Mengen respektive die einzelnen Lösungsräume so übereinander gelegt, dass sich ein gemeinsamer Lösungsraum in der Schnittmenge ergibt. Konstrukteure können dann über die Festlegung von Präferenzen eine konkrete Lösung auswählen. (Inoue et al. 2010)

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden die Konstruktionsparameter, die bisher in der PSD-Methode berücksichtigt wurden, um Nachhaltigkeitsaspekte erweitert. Zudem wurde, ebenfalls auf der Grundlage der PSD-Methode, ein Schwerpunkt auf das Thema Entscheidungsfindung gelegt, das heißt, es wurden die verschiedenen technischen und nachhaltigen Zielstellungen an das Produkt als Lösungsräume definiert und eine Entscheidung für eine Lösung herbeigeführt. Im Einzelnen umfasste dieses Vorgehen die folgenden Schritte:

1. Auswahl und Vorstellung der PSD Methode als Entscheidungsunterstützung für die Produktentwicklung (Kapitel 8.2),
2. Anwendung und Ergebnisdarstellung der PSD Methode auf ein Fallbeispiel, das die oben beschriebenen Einschränkungen berücksichtigt (Kapitel 8.3),
3. Auswertung und Fazit (Kapitel 8.4)

8.2 Methode des Preference Set-based Design (PSD)

Die PSD-Entwicklungsmethode ermöglicht es, dem Entwickler durch die Kombination verschiedener Lösungsräume in einem mehrstufigen Verfahren den Lösungsraum so einzuschränken, dass aus der Schnittmenge der verschiedenen Lösungsräume heraus eine passende Lösung ausgewählt werden kann. Dabei werden drei Schritten vollzogen (siehe Abbildung 57): Lösungsräume darstellen (Set Representation), Lösungsräume übertragen (Set Propagation) und Lösungsräume einschränken (Set Narrowing). Dazwischen liegen verschiedene Entscheidungspunkte, an denen zu einem vorherigen Schritt zurückgegangen werden kann. (Inoue et al. 2010a)

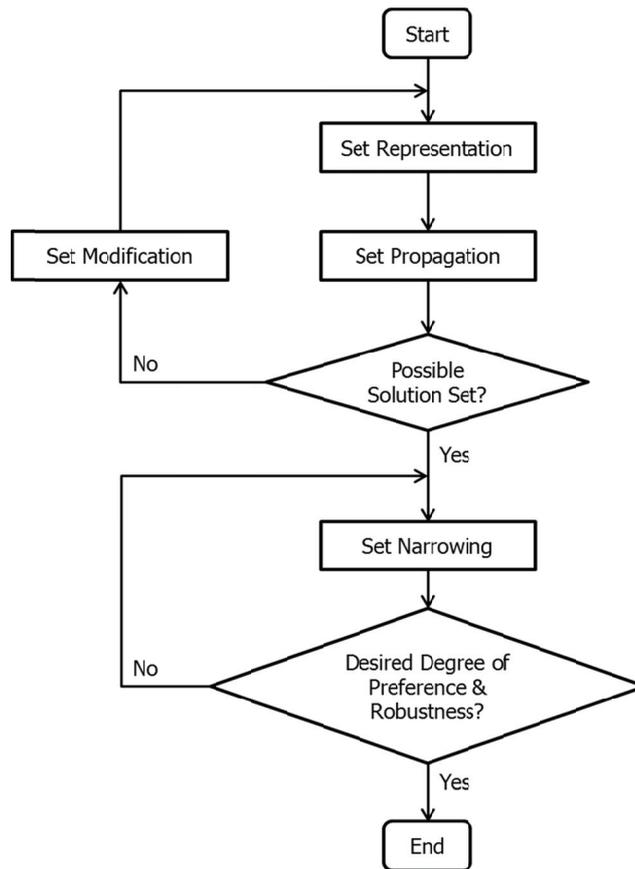


Abbildung 57: Vorgehensweise der Preference Set-based Design (PSD) Methode (Inoue et al. 2010a)

8.2.1 Lösungsräume darstellen

Die Darstellung und Manipulation von technischen Unsicherheiten in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses ist entscheidend. Im ersten Schritt der PSD-Methode (Set Representation) legt der Konstrukteur zunächst seine Präferenz der Konstruktionsvariablen (Produktmerkmale) und Leistungsanforderungen (Produkteigenschaften) unabhängig von verschiedenen Unsicherheiten fest und bestimmt damit die jeweiligen Lösungsräume. Um anschließend einen kontinuierlichen Lösungsraum darstellen zu können, werden sowohl das Intervall der Lösungsräume als auch die Präferenzfunktion als Menge abgebildet. Diese Menge wird als Präferenznummer bezeichnet. Die Präferenznummer wird verwendet, um die Konstruktionsvariablen und Leistungsanforderungen so zu spezifizieren, dass der Entwickler auf Grundlage seiner Kenntnisse und seines Wissens die Präferenzstruktur modellieren kann. Abbildung 58 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Präferenznummer, Konstruktionsvariablen und Leistungsanforderungen. (Inoue et al. 2012)

Die Präferenznummer Null gibt eine mögliche, aber nicht die gewünschte Lösung an, während die Nummer Eins das Ziel darstellt, das vom Entwickler maßgeblich verfolgt wird.

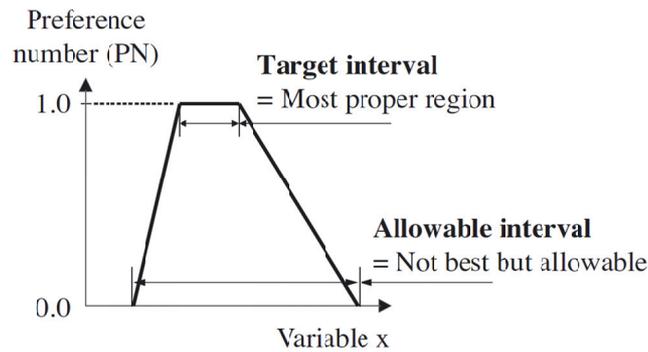


Abbildung 58: Set representation (Zusammenhang zwischen Präferenznummer, Konstruktionsvariablen und Leistungsanforderungen) (Inoue et al. 2012)

8.2.2 Lösungsräume übertragen

Im zweiten Schritt (Set Propagation) werden aus den einzelnen Lösungsräumen, die im ersten Schritt vom Konstrukteur festgelegt wurden, kontinuierliche Lösungsräume berechnet. Dazu werden die mathematischen Verfahren der Decomposed Fuzzy Arithmetic (zerlegte Fuzzy-Arithmetik) und der Extended Interval Arithmetic (erweiterte Intervallarithmetik) miteinander kombiniert. Auf die mathematische Berechnung wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, weil deren Anwendung im Vordergrund steht. Finch und Ward veröffentlichten dazu umfangreiche Ausarbeitungen (Finch und Ward 1996, Finch und Ward 1997). Abbildung 59 stellt die Übertragung von Lösungsräumen anschaulich dar. (Inoue et al. 2012)

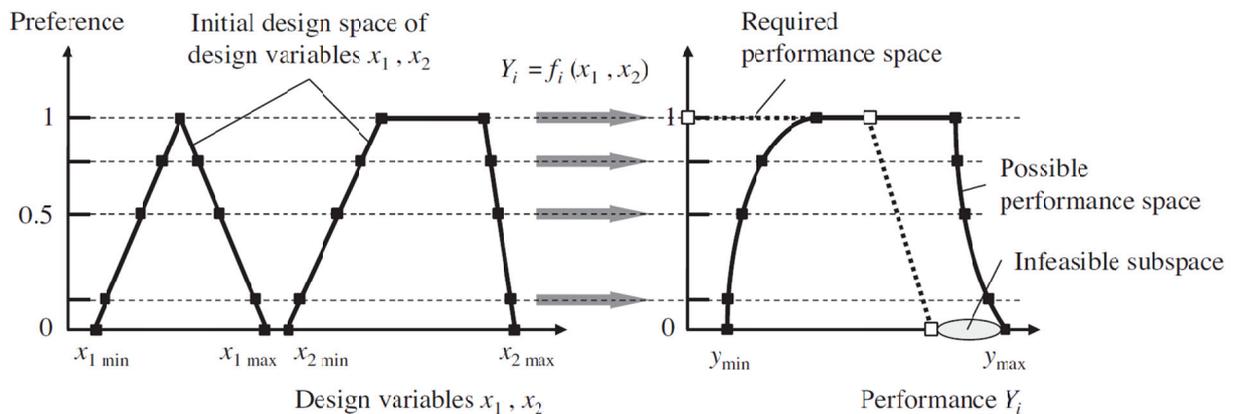


Abbildung 59: Übertragung von Lösungsräumen zu einem kontinuierlichen Lösungsraum (Inoue et al. 2012)

Die Intervalle der Entwurfsvariablen x_1 und x_2 werden über die Leistung Y_i durch die Abbildungsfunktion $Y_i = f_i(x_1, x_2)$ in Beziehung zueinander gesetzt. Um die möglichen kontinuierlichen Lösungsräume zu erhalten, wird die Achse der Präferenz in eine endliche Anzahl von Segmenten unterteilt (0,0; 0,1; 0,2; ...; 1,0). Das Intervall jeder Präferenznummer wird anschließend über den oben beschriebenen mathematischen Ansatz individuell propagiert.

Als Ergebnis liegt ein kontinuierlicher Lösungsraum in Form der Schnittmenge aller Lösungsraumintervalle vor. Ist dies nicht der Fall, müssen einzelne Lösungsräume angepasst werden und der Schritt der Set Propagation muss wiederholt werden – solange, bis ein kontinuierlicher Lösungsraum vorliegt. (Inoue et al. 2012)

8.2.3 Lösungsräume einschränken

Im kontinuierlichen Lösungsraum gibt es nach dem Schritt der Set Propagation überlappende Mengen von erforderlichen und möglichen Lösungen. Diese werden als umsetzbare Lösungsräume (Feasible Subspaces) bezeichnet. Gleichmaßen kann es passieren, dass erforderliche und mögliche Lösungsräume auch nicht umsetzbare Lösungsräume (Infeasible Subspaces) bilden. Diese Lösungsräume liegen außerhalb der Leistungsanforderungen. In einem solchen Fall schließt sich der Schritt des Set Narrowings an: Der kontinuierliche Lösungsraum muss verkleinert werden, um umsetzbare Lösungen identifizieren zu können. Anhand von Abbildung 60 und Abbildung 61 lässt sich der Schritt des Set Narrowings wie folgt erklären. (Inoue et al. 2012)

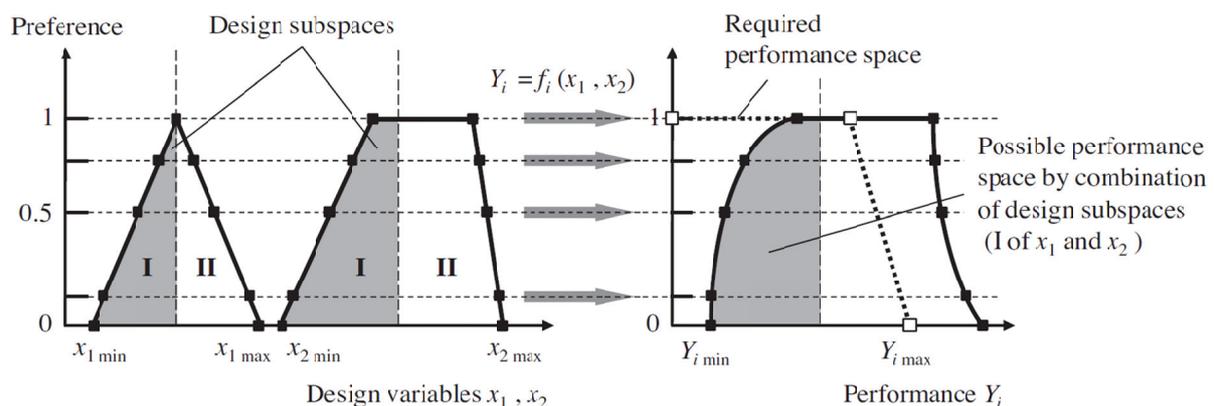


Abbildung 60: Identifizieren von umsetzbaren Lösungen im Schritt des set narrowings der PSD Methode (Inoue et al. 2012)

Der gesamte kontinuierliche Lösungsraum wird in zwei oder mehr gleich große Teile, gemessen entlang der Achse der Entwurfsvariablen, aufgeteilt. Dabei wird der Lösungsraum auf gleich große Intervalllängen der Präferenzstufe Null entlang aufgeteilt. Aus Abbildung 61 geht entsprechend hervor, dass die Teilräume I und II für die jeweiligen Entwurfsvariablen entstehen. In diesem Fall entstehen vier mögliche Kombinationen von Teillösungsräumen. Mit dem Schritt der Set Propagation werden diese Teillösungsräume zu einem kontinuierlichen Teillösungsraum zusammengeführt. Jetzt kann der Entwickler die Lösungen aus den überlagerten Teillösungsräumen (I für x_1 und I für x_2 wird zu I für x_1 und x_2 überlagert) auswählen, die seiner Präferenz am nächsten kommt und zugleich die Leistungsanforderungen erfüllen. (Inoue et al. 2012)

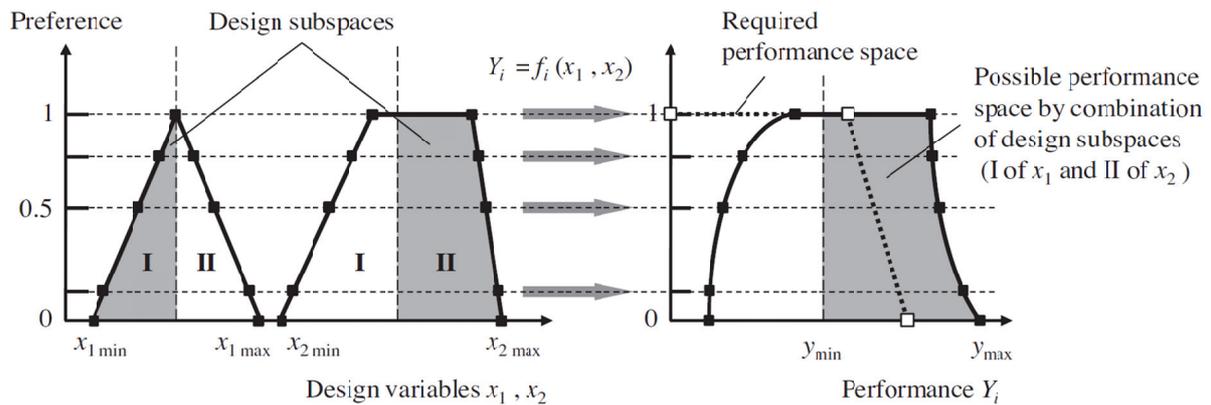


Abbildung 61: Identifizieren von umsetzbaren Lösungen durch Kombination von Teilräumen im Schritt des Set Narrowings der PSD Methode (Inoue et al. 2012)

Durch Kombination der Teilräume I und II besteht ferner die Möglichkeit, einen zusammengeführten Teillösungsraum zu schaffen. In diesem Fall werden die Teillösungsräume I für x_1 und II für x_2 überlagert. Es ergibt sich ein neuer Teillösungsraum, aus dem der Entwickler seine Lösung auswählen kann. Schlussendlich unterstützt die PSD-Methode Entwickler darin, eine Einzellösung mit dem höchsten Wert ihrer Präferenz für die Entwurfsvariablen auszuwählen. (Inoue et al. 2012)

8.3 Exemplarischer Anwendungsfall

8.3.1 Nachhaltigkeitsforderungen

Für die weitere Betrachtung im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden aus den Indikatoren (Kapitel 7.5) die CO₂-Emissionen und die Produktmasse ausgewählt. Beide Indikatoren lassen sich quantitativ beschreiben, was ein für die Anwendung der PSD-Methode notwendiges Merkmal darstellt. Außerdem weisen beide Indikatoren einen direkten sowie einen indirekten Bezug zu allen drei Nachhaltigkeitsdimensionen auf.

CO₂ ist der maßgebliche Indikator für Treibhausgase und damit für den Klimawandel verantwortlich. Das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung von Produkten liegt darin, die CO₂-Emissionen von Produkten über den gesamten Lebensweg zu minimieren. Darüber hinaus haben CO₂-Emissionen einen indirekten Einfluss auf ökonomische Aspekte (z.B. über Transportwege des Produktes). Gleichermäßen lassen sich indirekte Einflüsse auf soziale Aspekte feststellen: Steigende CO₂-Emissionen tragen zu einem globalen Temperaturanstieg bei. Dieser trägt wiederum zur einer veränderten Lebensmittelproduktion bei, die im schlimmsten Fall in einer Preissteigerung mündet. Das Gewicht von Produkten bestimmt über die Lebenszyklusprozesse (z.B. Transport, Nutzung) wiederum die CO₂-Emissionen.

8.3.2 Fallbeschreibung

Anhand einer Fallstudie wird im Folgenden aufgezeigt, wie mithilfe der PSD-Methode für technische Konstruktionsvariablen und nachhaltige Aspekte mit einem jeweils eigenem Lösungsraum ein gemeinsamer Lösungsraum gefunden werden kann, der es dem Entwickler ermöglicht, eine nachhaltige Lösung auszuwählen. Für die Anwendung der PSD-Methode wurde eine Fahrzeuglichtmaschine exemplarisch ausgewählt. Die Struktur einer Lichtmaschine (Bauteilanzahl und Verbindungen) ist überschaubar und bietet die Möglichkeit, an einem technischen Produkt die Wirksamkeit der PSD-Methode zu demonstrieren. In einem ersten Schritt wurde ein parametrisches CAD-Modell der Lichtmaschine auf Basis von Konstruktionsvariablen erstellt. Zur Erklärung: Entscheidende Variablen für die Leistung der Lichtmaschine sind die Länge und der Radius der Spule (siehe X_1 und X_2 in Abbildung 62). (Inoue et al. 2010b)

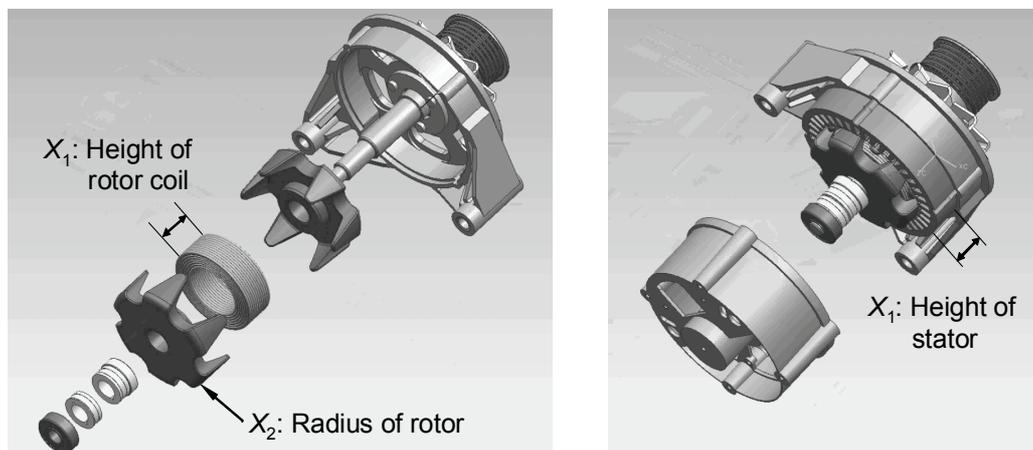


Abbildung 62: Parametrisches CAD-Modell mit Konstruktionsvariablen (Inoue et al. 2010b)

Die Leistungsanforderung der Lichtmaschine wird über die induzierte Leistung (Y_1) und über die Masse (Y_2) beschrieben. Beide Parameter haben einen Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Lichtmaschine: Die CO₂-Emissionen werden ebenfalls als Leistungsanforderung definiert (Y_3). Konstruktionsvariablen und Leistungsanforderungen hängen wie folgt zusammen²¹:

$$Y_1 = \frac{\pi \cdot n_{\text{revolution}}}{30} \cdot I^2 \cdot \mu \cdot n_{\text{layer}} \cdot n_{\text{pole}} \cdot \frac{X_1}{r_{\text{coil}}} \cdot X_2$$

Für die Studie wurden die Werte der Variablen bis auf die Werte der Konstruktionsvariablen X_1 und X_2 folgendermaßen festgelegt:

- Anzahl der Umdrehungen pro Minute: $n_{\text{revolution}} = 2000 \text{rpm}$
- Stromstärke: $I = 70 \text{A}$

²¹ Die Herleitung der Formel wird in Inoue et al. 2010b ausführlich beschrieben.

- Magnetische Permeabilität: $\mu = 2\pi \times 10^3$
- Anzahl der Wicklungen vom Rotor: $n_{\text{layer}} = 10$
- Anzahl der Pole vom Rotor: $n_{\text{pole}} = 12$
- Radius des Spulendrahts: $r_{\text{coil}} = 0.25 \times 10^{-3} \text{ m}$

Die Masse der einzelnen Bauteile wird automatisch aus dem CAD-Modell über die Software Siemens PLM NX berechnet.

Um eine Aussage über die Zusammenhänge zwischen Konstruktionsvariablen und Nachhaltigkeitseigenschaften treffen zu können, wurden zwei verschiedene End-of-Life (EoL) Szenarien für die einzelnen Bauteile des Fallbeispiels definiert (siehe Tabelle 12). Die EoL-Szenarien stellen die unterschiedlichen Möglichkeiten von Wieder- und Weiterverwendung sowie Entsorgung der Bauteile dar.

Bauteil	Material	EoL - Szenario #1	EoL - Szenario #2
Stator	Steel	Material recycling	Reuse
Rotor coil	Copper C10100	Material recycling	Reuse
Rotor	Iron Cast G25	Disposal (landfill)	Reuse
Drive shaft	Steel	Material recycling	Material recycling
Belt fitting	Aluminum6061	Material recycling	Material recycling
Fan	Steel	Reuse	Reuse
Spacer	Aluminum6061	Reuse	Reuse
Bearing	Rolled steel	Material recycling	Material recycling
Slip ring N	Copper C10100	Material recycling	Material recycling
Slip ring S	Copper C10100	Material recycling	Material recycling

Tabelle 12: End-of-Life Szenarien für Bauteile des Fallbeispiels Lichtmaschine (Inoue et al. 2010b)

Die EoL Szenarien wirken sich auf die Umweltbilanzierung der Lichtmaschine aus. Für die Berechnung der Umweltbelastung wurde auf die Vorgehensweise des Life Cycle Assessments (vgl. Kapitel 3.1.2.5) zurückgegriffen. Der Fokus lag dabei auf der Berechnung von CO₂-Emissionen. Auf die Berechnung wird an dieser Stelle nicht detailliert eingegangen. Diese findet sich in Inoue et al. 2010b, Inoue et al. 2010c und Inoue et al. 2012.

8.3.3 Anwendung und Ergebnisdarstellung

Im Schritt der Set Representation wurden die oben beschriebenen Anforderungen und Variablen in das prototypische Werkzeug der PSD-Methode eingetragen. Dadurch ergab sich ein Vergleich der beiden Szenarien, wie in Abbildung 63 dargestellt. Es entstand jeweils ein Lösungsraum für die Leistung, die Masse und die CO₂-Emissionen der Lichtmaschine. Insgesamt lagen damit drei Lösungsräume vor. In den jeweiligen Lösungsräumen sind die beiden Szenarien und die angestrebte Leistungsanforderung berücksichtigt.

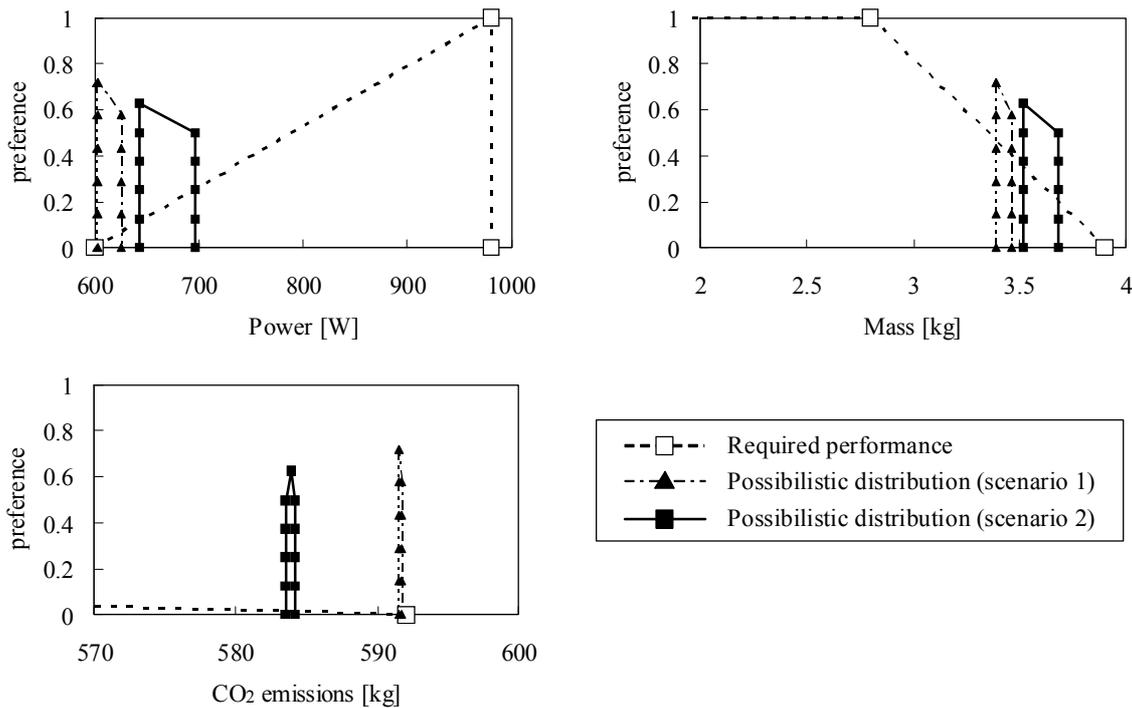


Abbildung 63: Vergleich der beiden Szenarien für die Lichtmaschine als Ergebnis des Schrittes der set representation (Inoue et al. 2010b)

Es zeigt sich, dass die abgegebene Leistung der Lichtmaschine in Szenario 2 höher als in Szenario 1 ist, wenngleich auch bei einer höheren Masse. Auch in Bezug auf die CO₂-Emissionen brachten die Szenarien unterschiedliche Ergebnisse hervor. So weist die Lichtmaschine in Szenario 2 geringere Emissionen auf als die in Szenario 1. Mit diesem Ergebnis kann der Entwickler bereits eine Entscheidung bezüglich der Leistungsanforderungen treffen und ein Szenario auswählen.

Zur Bestimmung der Lösungsräume für die Konstruktionsvariablen wurden im Schritt der Set Propagation die einzelnen Lösungsräume zusammengeführt und ein kontinuierlicher Lösungsraum erstellt. Abbildung 64 zeigt das Ergebnis dieses Schrittes für die beiden Konstruktionsvariablen X_1 (Länge der Spule) und X_2 (Radius der Spule).

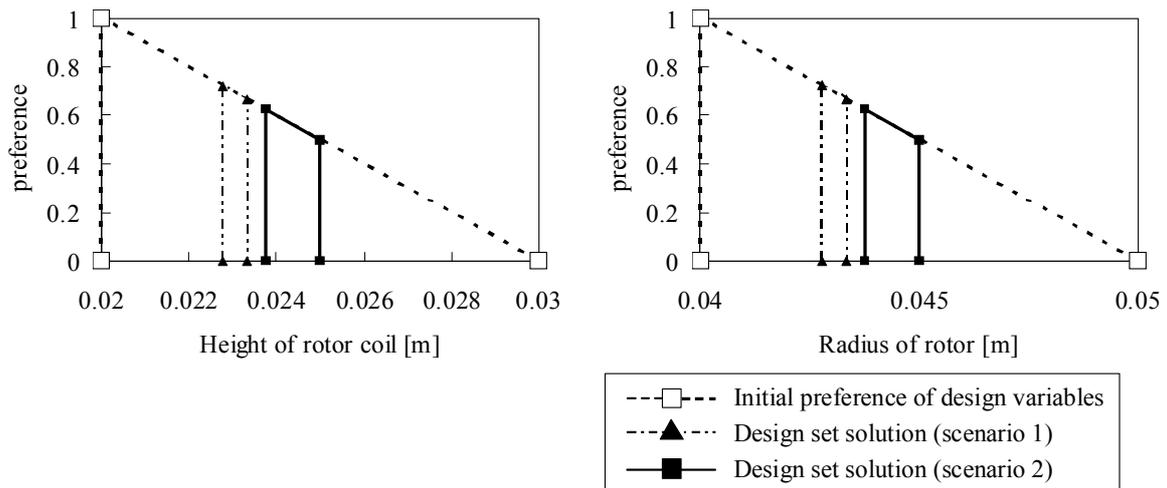


Abbildung 64: Kontinuierliche Lösungsräume für die Konstruktionsvariablen als Ergebnis des Schrittes der Set Propagation (Inoue et al. 2010b)

Entlang der Präferenzlinie zeigt sich, dass die Lösungen für die Konstruktionsvariablen in einem Intervall liegen. Hierbei kann festgehalten werden, dass die Lösungen für Szenario 2 ein breiteres Intervall besitzen, weil dieses Szenario nachhaltige Aspekte (CO₂-Emissionen) besser erfüllt als Szenario 1.

Im letzten Schritt der PSD-Methode wurden die Lösungsräume aufgeteilt, d.h. die beiden Szenarien wurden zusammengeführt, um herauszufinden, wie die Konstruktionsvariablen gewählt werden müssen, wenn nicht eindeutig ist, wie das EoL-Szenario für die Lichtmaschine aussieht. Dazu wurden die beiden Lösungsräume für eine Leistungs- bzw. Nachhaltigkeitsorientierung berechnet. Abbildung 65 zeigt, dass die Lösungsräume für CO₂-Emissionen, Leistung und Masse variieren: Je weniger Masse eingesetzt wird, desto geringer werden die CO₂-Emissionen; dabei sinkt allerdings auch die abgegebene Leistung der Lichtmaschine. Für diesen speziellen Fall gibt es sogar eine Überlagerung der beiden Lösungsräume in einem Punkt. Hier liegt das Optimum zwischen Nachhaltigkeits- und Leistungsorientierung: Der Entwickler kann sich für einen Kompromiss entscheiden.

Das gleiche Bild ergibt sich auch für die Konstruktionsvariablen Radius und Länge der Spule, wie Abbildung 66 darlegt.

Es lässt sich festhalten: Über die Anwendung der PSD werden dem Entwickler konkrete Lösungsräume für Leistungsanforderungen und Konstruktionsvariablen aufgezeigt. Diese Lösungsräume dienen als Unterstützung beim Treffen einer leistungs- oder nachhaltigkeitsorientierten Entscheidung. Darüber hinaus besteht das Potential, einander überlappende Lösungsräume zu finden und somit ein Optimum zwischen Leistungs- und Nachhaltigkeitsorientierung zu erzielen.

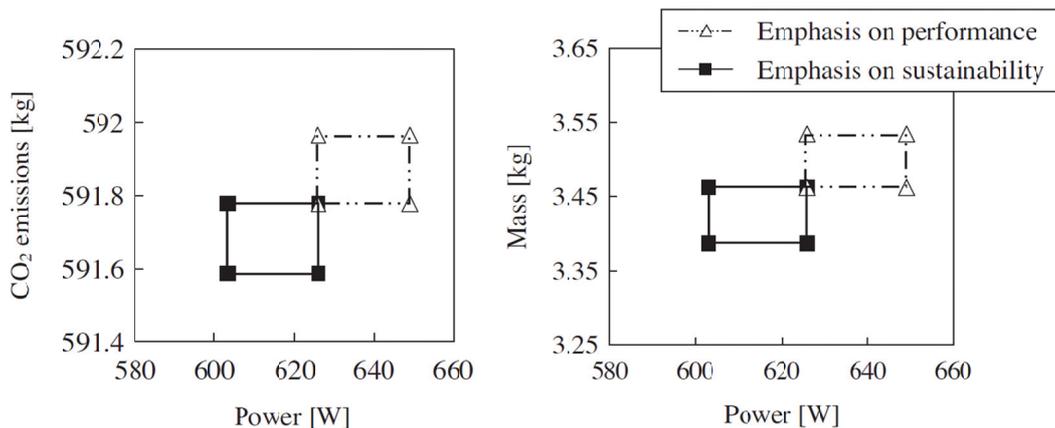


Abbildung 65: Lösungsräume für Nachhaltigkeits- und Leistungsorientierung als Ergebnis des Schrittes des set narrowings (Inoue et al. 2012)

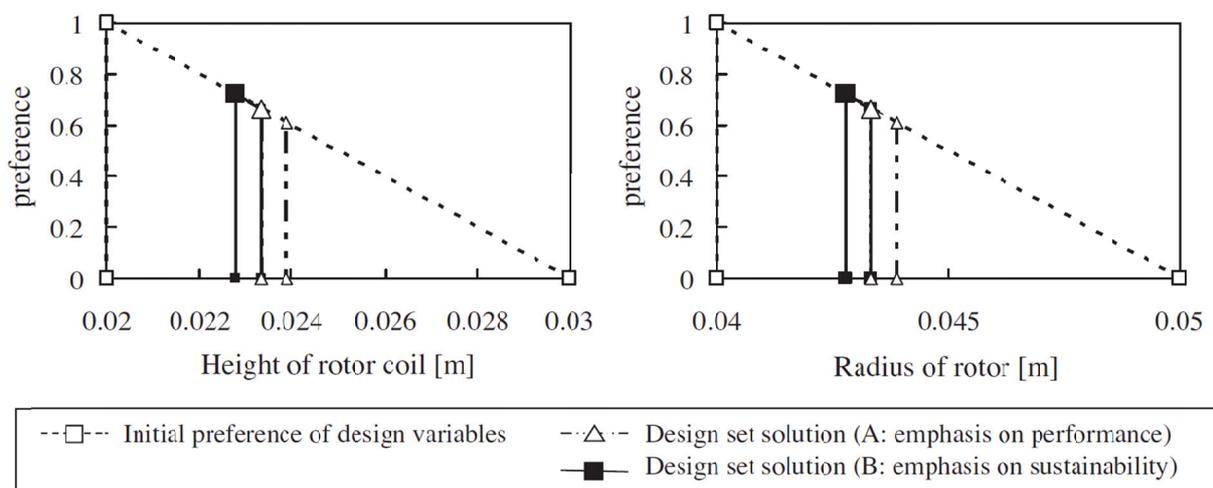


Abbildung 66: Lösungsräume für die Konstruktionsvariablen als Ergebnis des Schrittes des set narrowings (Inoue et al. 2012)

8.4 Auswertung und Fazit

Mit der Machbarkeitsstudie konnte nachgewiesen werden, dass es mithilfe der PSD-Methode möglich ist, von einer gesteuerten in eine angeleitete Vorgehensweise überzugehen. Die PSD-Methode ermöglicht es, durch die Kombination verschiedener Lösungsräume eine Schnittmenge zu schaffen, aus der eine geeignete Lösung unter Berücksichtigung von Leistung und Nachhaltigkeit ausgewählt werden kann. Unter Anwendung der PSD-Methode lassen sich einerseits die technisch beste Lösung sowie auch die nachhaltigste Lösung identifizieren. Auf diese Weise können durch Kombination von Leistungs- und Nachhaltigkeitsorientierung Lösungsräume gefunden werden, die beiden Ansprüchen genügen.

Entwickler können anhand der verschiedenen Lösungsräume Produktalternativen schon in den frühen Phasen der Entwicklung miteinander vergleichen. Der Lösungsraum wird durch die PSD Methode zusätzlich eingeschränkt. Produktalternativen, die außerhalb des Lösungsraums liegen, brauchen vom Entwickler zur Entscheidung nicht in Betracht gezogen werden.

Die mit der PSD Methode bestimmten Konstruktionsvariablen können in das CAD-Modell zurückgegeben werden. Dieses Modell passt sich aufgrund seiner Parametrisierung automatisch an. Entwickler haben somit die Möglichkeit, ihre Produktmodelle schnell an sich verändernde Nachhaltigkeits- oder Leistungsanforderungen anzupassen.

Die Machbarkeitsstudie zeigte aber auch folgende Einschränkungen der PSD-Methode auf: Zum einen werden quantitativ messbare Nachhaltigkeitsindikatoren für die Berechnung benötigt; qualitative Nachhaltigkeitsziele einzubeziehen, stellt weiterhin eine Herausforderung für die Produktentwicklung dar. Zum anderen kann die LCA-basierte Berechnung für ausgewählte Nachhaltigkeitsindikatoren nur erfolgen, wenn komplette Lebenswegmodelle aufgestellt und vorweggedacht werden. Diese Lebenswegmodelle bilden die Grundlage zur Berechnung der Werte, die wiederum in den Zusammenhang mit technischen Anforderungen gesetzt werden können. In der Praxis lassen sich komplette Lebenszyklen jedoch nicht eindeutig vorhersagen. Allerdings können viele mögliche Lebenszyklusszenarien erstellt werden, über die wiederum eine Kompromiss-Lösung hinsichtlich einer Leistungs- und Nachhaltigkeitsorientierung herbeigeführt werden kann.

Abschließend kann vor dem Hintergrund der Machbarkeitsstudie festgestellt werden: Konstruktionsparameter und Nachhaltigkeitseigenschaften eines Produktes hängen unmittelbar miteinander zusammen, und methodische Vorgehensweisen können schon in den frühen Phasen der Produktentwicklung anleitend wirksam werden. Die Studie zeigt somit auf, dass das Konzept aus Kapitel 7 zu einer anwendungsfähigen Vorgehensweise weiterentwickelt werden kann.

9 Entwicklung einer anwendungsfähigen Vorgehensweise

Auf Basis der Erkenntnisse aus der Machbarkeitsstudie (Kapitel 8) und dem Konzept für ein neues Entwicklungsvorgehen (Kapitel 7) wird im Folgenden eine anwendungsfähige Vorgehensweise entwickelt. Hierzu werden zunächst die Anforderungen an die Vorgehensweise (Kapitel 9.1) und ein Anwendungsszenario (Kapitel 9.2) definiert. Darauf folgt die Darstellung einer prototypischen Umsetzung der neuen Vorgehensweise (Kapitel 9.3); diese wird abschließend an einem Anwendungsbeispiel demonstriert (Kapitel 9.4). Das Kapitel endet mit einer Auswertung und einem Fazit (Kapitel 9.5).

9.1 Anforderungen

Die bisherigen Analysen haben gezeigt, dass auf der operativen Unternehmensebene Lösungen geschaffen werden müssen, die den Entwickler darin unterstützen, ein nachhaltiges Produkt hervorzubringen (vgl. Kapitel 5). Dazu muss das ständige Wechselspiel zwischen Analyse und Synthese in der Produktentwicklung, wie in den Regelkreisen (vgl. Kapitel 7) bereits beschrieben, unterstützt werden. Analyse und Synthese finden auf der operativen Ebene der Nachhaltigkeitspyramide statt. Ziel dieses Kapitels ist es, für diese Ebene eine anwendungsfähige Vorgehensweise für die Entwicklung nachhaltiger Produkte hervorzubringen, die auf dem Konzept einer neuen Entwicklungsvorgehensweise basiert (Kapitel 7). Die Vorgehensweise umfasst die folgenden Ebenen:

- I. Prozess und Organisation,
- II. Entwicklungsaktivitäten und -methoden,
- III. Informationstechnologien und Werkzeuge sowie
- IV. Informationsartefakte und -standards.

Nach Lindahl und Ekermann (Lindahl und Ekermann 2013) müssen Vorgehensweisen im beschriebenen Umfeld vier Hauptanforderungen erfüllen, die sich wie folgt beschreiben lassen:

1. Anpassbar und einfach zu implementieren: Die Vorgehensweise muss an existierende Vorgehensweisen des jeweiligen Unternehmens angepasst werden können. Darüber hinaus muss sie auf allen vier Ebenen einfach zu implementieren sein.
2. Entwicklungsbegleitend und unterstützend: Die Vorgehensweise erweitert andere Vorgehensweisen der Produktentwicklung komplementär. Außerdem unterstützt die Vorgehensweise Entwickler darin, Nachhaltigkeitsanforderungen zu erfüllen.
3. Risikominimierend: Die Vorgehensweise soll sicherstellen, dass alle notwendigen Schritte durchgeführt werden, um Nachhaltigkeitsziele zu erreichen. Dabei sollen keine Aspekte benachteiligt werden oder unberücksichtigt bleiben.
4. Zeitreduzierend: Die Vorgehensweise muss, im Vergleich zu bisherigen Vorgehensweisen der Zielerreichung, den Entwickler effizient unterstützen.

Unter Berücksichtigung der Anforderungen und des in Kapitel 7 entwickelten Konzeptes gilt es, eine Lösung über die vier beschriebenen Ebenen zu schaffen. Dabei muss die anwendungsfähige Vorgehensweise die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Der Transfer von Produktparametern und Nachhaltigkeitsinformationen erfolgt automatisiert.
- Die Produktinformationen stammen aus einer zentralen Datenbasis.
- Der Aufwand für die Informationsbeschaffung wird reduziert.
- Zwischen Produktkomponenten und Nachhaltigkeitsinformationen besteht eine direkte Verbindung.
- Der Transfer von Beurteilungsergebnissen erfolgt automatisiert.

In der Machbarkeitsstudie (Kapitel 8) wurde nachgewiesen, dass Produktmerkmale und -eigenschaften im direkten Zusammenhang mit Nachhaltigkeitszielen stehen. Es wurde eine anleitende Methode gefunden, die Ingenieurinnen und Ingenieure darin befähigt, ein Optimum zwischen technischer Lösung und Nachhaltigkeitserfüllung zu finden. Dieser Ansatz wird auch für die Entwicklung einer anwendungsfähigen Vorgehensweise aufgegriffen. Die Anforderung, die sich daraus ergibt ist, dass die Vorgehensweise anleitend und nicht gesteuert sein soll (vgl. Kapitel 7.2).

Unter den identifizierten Anforderungen wird die Entwicklung und Anwendung der neuen Vorgehensweise in den folgenden Kapiteln beschrieben.

9.2 Anwendungsszenario

Anhand der Machbarkeitsstudie wurde nachgewiesen, dass ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Konstruktionsparametern und der Nachhaltigkeitsbewertung besteht (vgl. Kapitel 8). Darüber hinaus wurde in der Konzeptdarstellung (vgl. Kapitel 9) die Grundzüge der neuen Vorgehensweise beschrieben, Regelkreise definiert sowie allgemein gültige Lösungen für die Ebenen Prozess und Organisation, Entwicklungsaktivitäten und -methoden, Informationstechnologien und Werkzeuge, Informationsartefakte und -standards und deren Integration beschrieben.

Das im Folgenden exemplarisch herangezogene Anwendungsszenario orientiert sich an dieser neuen Entwicklungsvorgehensweise. Auf operativer Ebene müssen dafür die drei Schritte Produktentwicklung, Produktdatenmanagement und Nachhaltigkeitsbewertung durchlaufen wie folgt werden:

- Im Schritt der Produktentwicklung werden die Gestalteigenschaften (z.B. Geometrie und Material) eines Produktes in einem CAD-System festgelegt.
- Im Schritt des Produktdatenmanagements werden die im CAD-System erzeugten Produktdaten, Geometrie und Metainformationen verwaltet und strukturiert. Dies erfolgt mit Unterstützung von PDM-Systemen.
- Im Schritt der Nachhaltigkeitsbewertung werden passend zum Produkt Lebenswegmodelle aufgebaut und alle notwendigen Informationen zur Bewertung des Produktes zusammengetragen. Dafür wird spezielle Software eingesetzt, die neben der Berechnungslogik auch an Datenbanken mit Nachhaltigkeitsinformationen angebunden ist.

Ziel des Anwendungsszenarios ist es, auf der operativen Ebene Entwicklungsingenieure zu befähigen, ein vorgegebenes ökologisches Entwicklungsziel zu erreichen. Dies soll mit geeigneter methodischer und informationstechnischer Unterstützung erreicht werden.

9.3 Prototypische Umsetzung

9.3.1 Prozess und Organisation

Für die Lösungsentwicklung spielen Meilensteine, die Entwicklungsphasen voneinander abgrenzen, eine wesentliche Rolle. In Meilensteinzielen werden Nachhaltigkeitsziele bzw. Nachhaltigkeitsforderungen verankert. Dies ist weitgehend Aufgabe der Unternehmensführung und Produktplanung und stellt die grundlegende Voraussetzung für die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsforderungen im Entwicklungsprozess dar.

Der Lösungsraum auf der Ebene Prozess und Organisation kann zunächst beliebig komplex gestaltet werden. Für eine prototypische informationstechnische Umsetzung allerdings muss der Lösungsraum eingeschränkt werden. Dazu bietet sich ein deduktiver Ansatz an: Auf Basis einer praxisrelevanten Meilensteinforderung in Produktentwicklungsprojekten wird eine gängige methodische Vorgehensweise zum Erreichen des Meilensteinziels vorausgewählt.

In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, dass entsprechende Meilensteinziele im Entwicklungsprozess festgelegt sind. Meilensteinziele können beispielsweise Grenzwerte für Lärm- und CO₂-Emissionen sein, wie der praxisnahen Studie zum Lebenszyklusdenken und -handeln (vgl. Kapitel 5) entnommen werden kann. Diese Meilensteinziele und der damit verbundene Entwicklungsprozess sind exemplarisch in Abbildung 67 dargestellt.

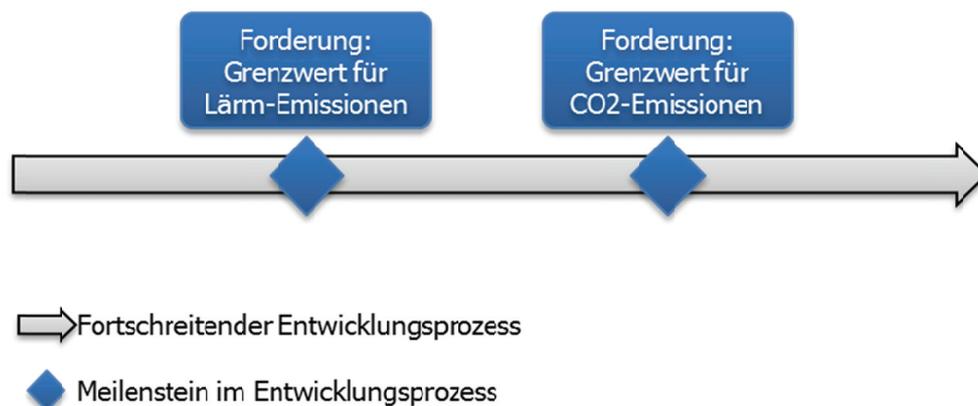


Abbildung 67: Nachhaltige Meilensteinziele im Entwicklungsprozess

9.3.2 Entwicklungsaktivitäten und -methoden

Über den geeigneten Einsatz von Entwicklungsmethoden soll sichergestellt werden, dass die definierten Meilensteinziele eingehalten werden. Das beschriebene Konzept in Kapitel 7 schlägt eine Harmonisierung existierender Methoden zur Entwicklung nachhaltiger Produkte (z.B. Simplified LCA, Ten Golden Rules, Environmental-FMEA) über die entwickelte Taxonomie vor. Nachhaltigkeitsziele sollen möglichst entwicklungsbegleitend erreicht werden, damit die Iterationen über die Regelkreise und somit der Zeitaufwand der Entwicklung gering gehalten wird.

Für die prototypische Umsetzung wird ein Einzelfall exemplarisch herausgenommen (siehe Abbildung 68): die Erbringung des Nachweises über die Einhaltung eines CO₂-Grenzwertes durch die Anwendung einer Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment).

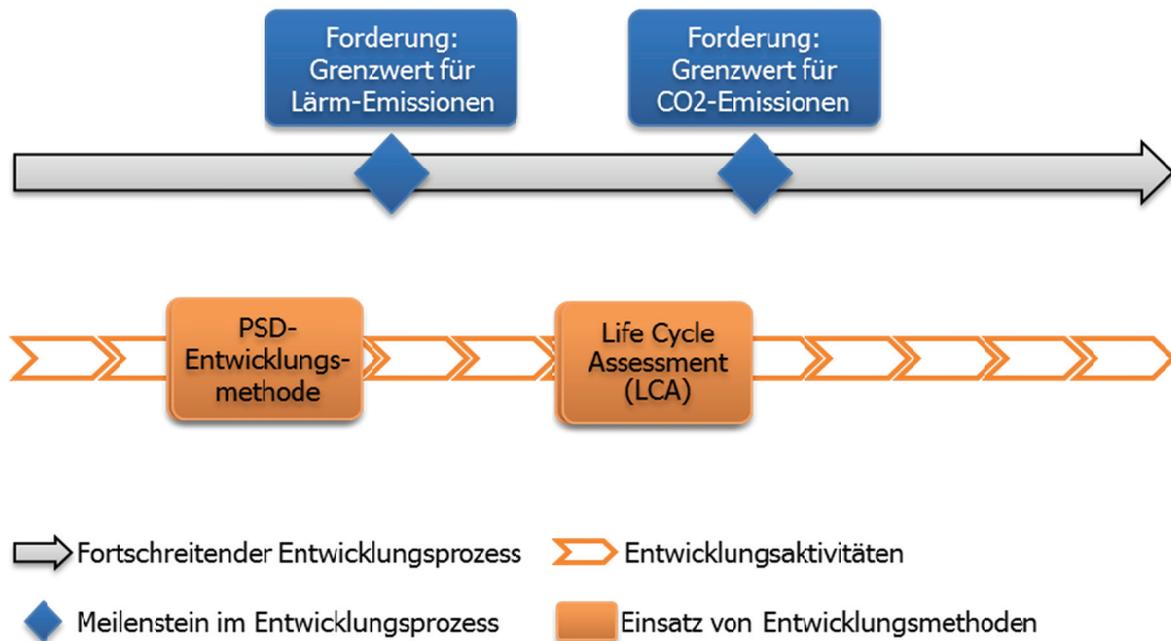


Abbildung 68: Nachhaltige Meilensteinziele und Entwicklungsmethoden im Entwicklungsprozess

9.3.3 Informationstechnologien und Werkzeuge

Auf der Ebene der Informationstechnologien und Werkzeuge wird das Ziel verfolgt, Nachhaltigkeitsinformationen und Evaluierungsmechanismen in die Arbeitsumgebung des Entwicklungsingenieurs zu integrieren. Durch die Festlegung von Prozess (Meilensteinforderung) und Methode (Nachweis zur Erfüllung der Meilensteinforderung) sind die folgenden Randbedingungen für die informationstechnische Unterstützung gesetzt:

- Auf der Prozessebene wird beispielhaft das Ziel der CO₂-Bewertung ausgewählt: Zu einem bestimmten Meilenstein im Entwicklungsprozess soll ein Nachweis über die Einhaltung eines CO₂-Wertes erbracht werden.
- Für die Berechnung des CO₂-Wertes wird zur Erreichung des Nachweises auf methodischer Ebene ein LCA (Life Cycle Assessment) ausgewählt.

Für die Anwendung der LCA auf IT-Systemebene wurde folgender informationstechnischer Lösungsansatz gewählt: Ein PLM-System stellt die zentrale Informations- und Datenbasis für Entwicklungstätigkeiten dar. Für die prototypische Implementierung wurde das PDM-System Teamcenter 8.3 von Siemens PLM ausgewählt. Siemens PLM ist Unterzeichner des Conduct of Open PLM²². Für Teamcenter werden die Datenmodelle offengelegt und die Dokumentation frei verfügbar gemacht (z.B. Business Modeler IDE Guide). Dadruch ergibt sich die Möglichkeit zum Customizing der Software für externe Anwender.

²² Der ProSTEP iVIP e.V. initiierte den „Code of PLM Openness (CPO)“. Aus der Automobilindustrie heraus wurden im Jahr 2007 erste Bestrebungen zu einem offenen Umgang mit PDM-Systemen gestartet. Die Anzahl der unterstützenden produzierenden Unternehmen und der IT-Systemanbieter steigt seitdem.

Ein weiterer Grund für die Auswahl von Siemens PLM Teamcenter 8.3 ist die Anbindung an ein gängiges CAD-Autorensystem, speziell an Siemens PLM NX 7.5. Teamcenter 8.3 und NX 7.5 integrieren Daten und Informationen weitgehend zuverlässig. So können geometrische Modelle, die in NX 7.5 erstellt werden, inklusive vorhandener Metainformationen, wie z.B. zugewiesenes Material (Werkstoff) und berechnetes Volumen, in Teamcenter 8.3 abgelegt werden. Gleichmaßen können beispielsweise Produktstrukturierungen, die in Teamcenter 8.3 erstellt wurden, in NX 7.5 eingelesen und weiter verarbeitet werden. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die informationstechnische Integration von CAD- und PDM-Anwendungen bei den meisten IT-Systemanbietern ein fester Bestandteil im Produktportfolio ist.

Eine Übersicht der IT-Systeme und deren Einbettung in die Ebenen Prozess und Organisation sowie Entwicklungsaktivitäten und -methoden stellt Abbildung 69 übersichtlich dar.

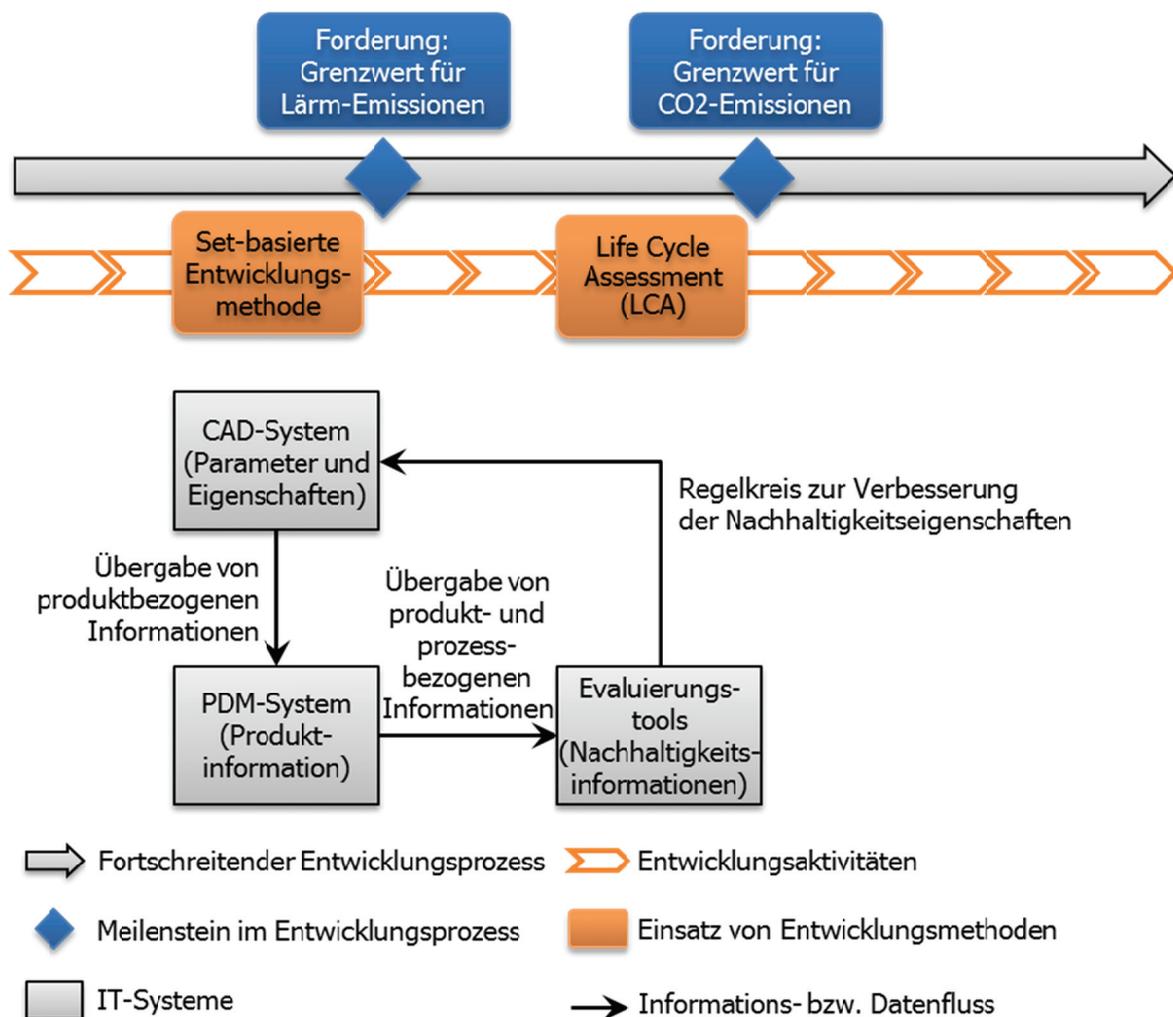


Abbildung 69: Nachhaltige Meilensteinziele, Entwicklungsmethoden und IT-Systeme im Entwicklungsprozess

9.3.4 Informationsartefakte und -standards

Die Sustainability Information Objects (SIO), wie sie im Konzept (vgl. Kapitel 7) beschrieben wurden, gilt es nun, in ein PLM-System zu integrieren. Damit wird ein standardisierter Wissensaustausch zwischen den Teilsystemen ermöglicht. Die Nachhaltigkeitsinformationen können direkt mit Entwicklungsmodellen verknüpft werden. Auf die gewählte IT-Systemumgebung übertragen, bedeutet dieser Schritt die Einbettung von SIO in Teamcenter. Abbildung 70 verdeutlicht die Integration der SIO in das PLM-System und damit in Entwicklungsprozess.

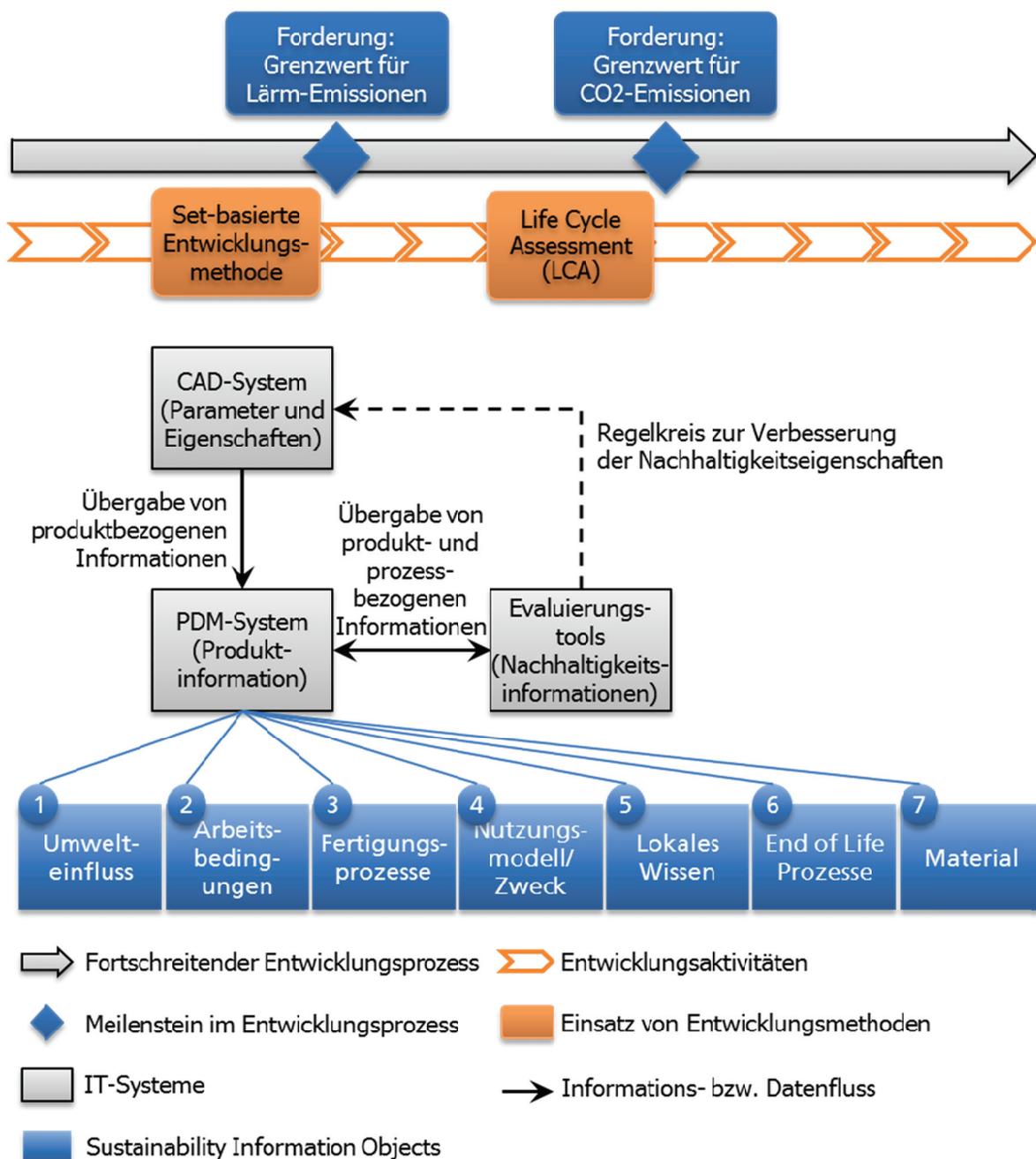


Abbildung 70: Nachhaltige Meilensteinziele, Entwicklungsmethoden und IT-Systeme und Sustainability Information Objects im Entwicklungsprozess

Die SIO basieren auf Teamcenter Templates für Formularobjekte. Für die prototypische Umsetzung wurde ein Formular vordefiniert, das alle Informationen der SIO enthält. Das Formular wird im Folgenden als SIO verstanden. Beim Speichern einer neuen Geometrie in Form eines Items in einer Produktstruktur wird das SIO unter der Item Revision angelegt (Abbildung 71).

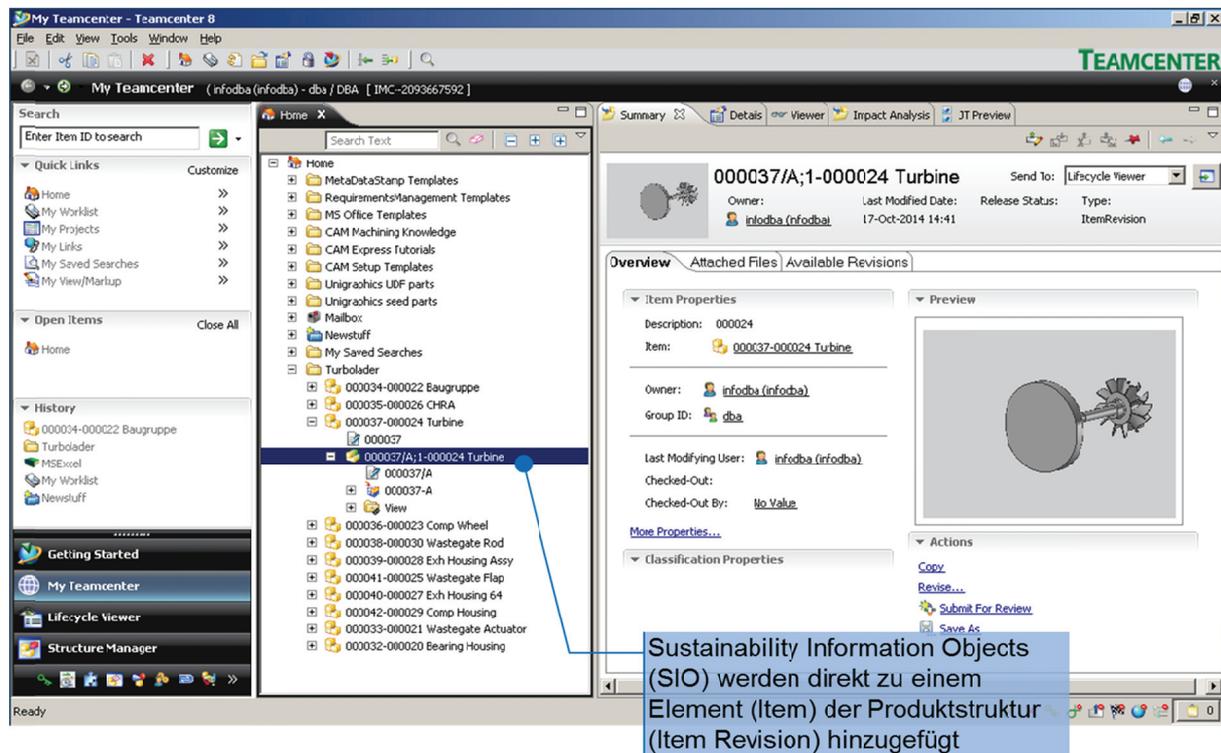


Abbildung 71: Integration von SIO in die Produktstruktur von Siemens PLM Teamcenter 8.3

Die Informationen für die SIO werden entweder vom Benutzer eingetragen oder aus dem CAD-System beim Speichern der Geometrie in Teamcenter übernommen. Abbildung 72 zeigt ein erstelltes SIO in Teamcenter. Zur Übersichtlichkeit sind die Informationen entsprechend ihrer Klasse zugeordnet. Über die Schaltfläche „Check-Out and Edit“ lässt sich das SIO mit Informationen füllen oder editieren.

Die erste Klasse beschreibt das Material und besteht aus zwei Instanzen: die Definition des Materials und der Masse. Beide Werte werden automatisch aus dem CAD-System übernommen. Sie lassen sich nicht aus Teamcenter heraus ändern oder eingeben, sondern nur durch eine neue Materialzuweisung oder durch eine Änderung der Geometrie im CAD-System. Damit wird eine redundante Informationshaltung vermieden.

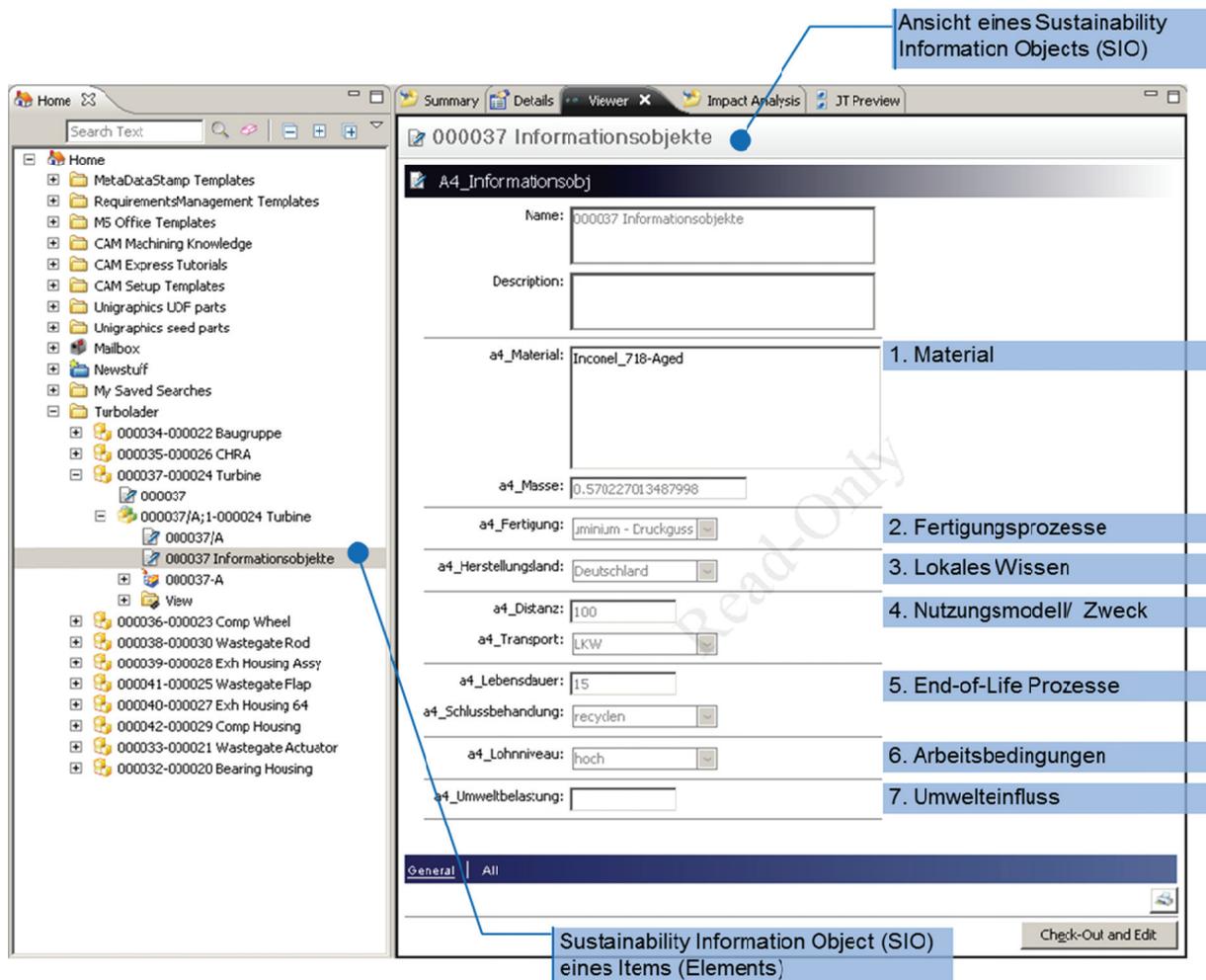


Abbildung 72: Einbettung der Sustainability Information Objects in Siemens PLM Teamcenter am Beispiel eines Items

Die Angaben für die Instanziierungen der fünf Klassen Fertigungsprozesse, Lokales Wissen, Nutzungsmodell/ Zweck, End-of-Life Prozesse und Arbeitsbedingungen des SIO müssen vom Benutzer in Teamcenter eingetragen werden. Diese Daten werden für die Analyse der Umweltauswirkung benötigt. Tabelle 13 zeigt eine Übersicht der Klassen mit beispielhaften Instanziierungen.

Für die prototypische Implementierung der SIO wurden Wertelisten hinterlegt, die in 0 aufgeführt sind. Die Wertelisten erleichtern das Arbeiten mit den SIO, weil der Nutzer beispielsweise vordefinierte Prozesse bei der End-of-Life Abwicklung auswählen kann. Die Klasse des Umwelteinflusses repräsentiert das Ergebnis der ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung. Die entsprechenden Informationen stammen aus dem Evaluierungstool GaBi für das Life Cycle Assessment.

Ein Daten- bzw. Informationsaustausch zwischen dem PLM-System Teamcenter und dem Evaluierungstool GaBi ist nicht ohne weiteres möglich, weil in beiden Systemen keine einheit-

lichen Standardaustauschformate existieren und auch keine geeigneten Schnittstellen vorhanden sind. Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit programmierte Tool GaBi2Teamcenter gewährleistet den Daten- bzw. Informationsaustausch.

SIO-Klassen	Instanziierungen (Beispiele)	Informationsbezug
1. Material	1.1 Werkstoff	Automatisch aus CAD
	1.2 Masse	Automatisch aus CAD
2. Fertigungsprozesse	2.1 Fertigungsart	Auswahlliste in Teamcenter
3. Lokales Wissen	3.1 Herstellungsland	Auswahlliste in Teamcenter
4. Nutzungsmodell/ Zweck	4.1 Transportwegstrecke	Werteingabe
	4.2 Transportart	Auswahlliste in Teamcenter
5. End-of-Life Prozesse	5.1 Produktlebensdauer	Werteingabe
	5.2 End-of-Life Abwicklung	Auswahlliste in Teamcenter
6. Arbeitsbedingungen	6.1 Lohnniveau	Auswahlliste in Teamcenter
7. Umwelteinfluss	7.1 CO ₂ Äquivalent	Automatisch aus GaBi2TC

Tabelle 13: SIO Klassen mit exemplarischen Instanziierungen

9.4 Anwendungsbeispiel

Im Nachfolgenden wird gezeigt, wie die prototypische Umsetzung angewandt wird. Dazu wird das Produktbeispiel eines Abgasturboladers²³ aus dem Bereich der Mobilität aufgegriffen. Ein Abgasturbolader bietet die hinreichende Produkttiefe als Teilsystem eines Automobils (Beeinflussung der Nachhaltigkeit eines Teilsystems im Gesamtsystem; Beispiel: Wahl des Produktionsstandorts) und die notwendige Komplexität zur Demonstration von Herausforderungen bei der Auslegung aus Ingenieursicht (Auslegung des Teilsystems zum Erreichen von Nachhaltigkeitszielen; Beispiel: Bauteilgeometrie und -masse).

Das übergeordnete Ziel besteht darin, Lösungen zu finden, die im Vergleich zueinander geringere Umweltbelastungen erzeugen. Dafür wird für das Produkt bzw. dessen Varianten jeweils eine Ökobilanzierung (LCA, vgl. Kapitel 3.1.2.5) durchgeführt.

²³ Als Beispielprodukt wird der Abgasturbolader GT2860R der Firma Garrett verwendet. Durch den Einsatz von Turboladern kann die Leistung von Motoren erhöht werden. Die Leistung eines Motors hängt unter anderem von der Kraftstoffverbrennung ab. Turbolader ermöglichen eine Verdichtung der Frischluft. Durch das geänderte Kraftstoff-Luft-Gemisch kann mehr Kraftstoff durch den höheren Anteil von Sauerstoff verbrannt und damit die Leistung erhöht werden. Die Steigerung der Motorleistung durch eine Aufladung ermöglicht eine erhöhte spezifische Leistung bei unveränderter Drehzahl und Hubraum des Motors. Gewicht und Größe des Motors steigen bei der Aufladung nicht an. (Pucher und Zinner 2012, S. 8ff.)

Das Anwendungsbeispiel wird im Rahmen des Bewertungsregelkreises der neuen Vorgehensweise zum Entwickeln nachhaltiger Produkte (vgl. Kapitel 7.6, Auszug siehe Abbildung 73) durchgeführt. Ziel ist es, einen Konstruktionsentwurf um ein Konstruktionsmodell zu erweitern. So können die Umweltauswirkungen bezüglich des CO₂-Wertes für verschiedene Produktvarianten bilanziert werden. Damit läge eine Entscheidungsvorlage vor.

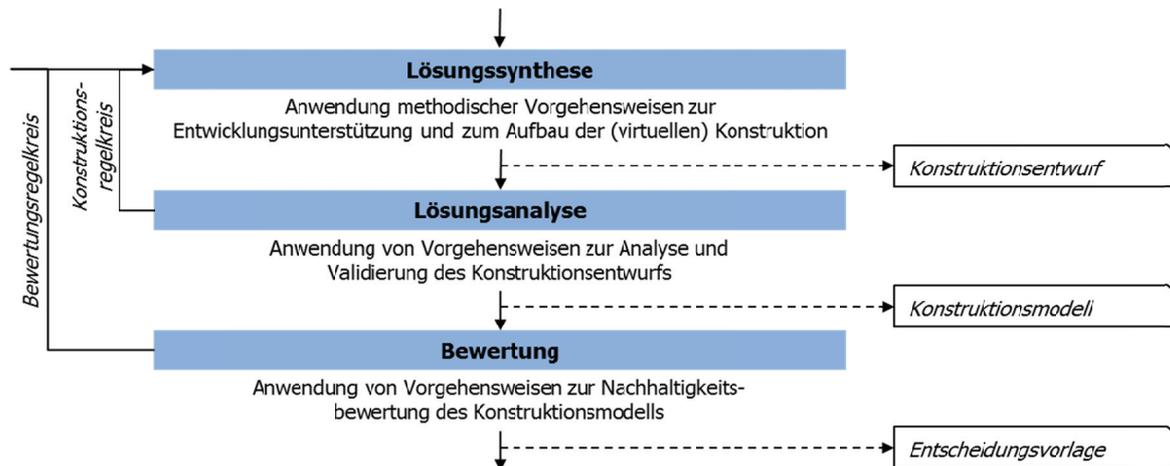


Abbildung 73: Auszug der neuen Vorgehensweise zum Entwickeln nachhaltiger Produkte (vgl. Kapitel 7.6)

Lösungssynthese

Den Ausgangspunkt der folgenden Betrachtung bildet der Konstruktionsentwurf als Ergebnis der Lösungssynthese (vgl. neue Entwicklungsvorgehensweise in Kapitel 7.6). Der Entwurf liegt als Geometriemodell in einer Produktstruktur im PLM-System Teamcenter vor. Die Teilebezeichnungen wurden beim Import vom CAD-System NX nach Teamcenter automatisch angelegt. Abbildung 74 zeigt auf der linken Seite die entsprechende Produktstruktur. Auf der rechten Seite ist eine Vorschauansicht des Geometriemodells zu sehen. Die Gesamtstruktur des Turboladers beinhaltet 12 Strukturelemente (BOM-Lines) erster Ordnung, die die wesentlichen Teile des Turboladers repräsentieren.

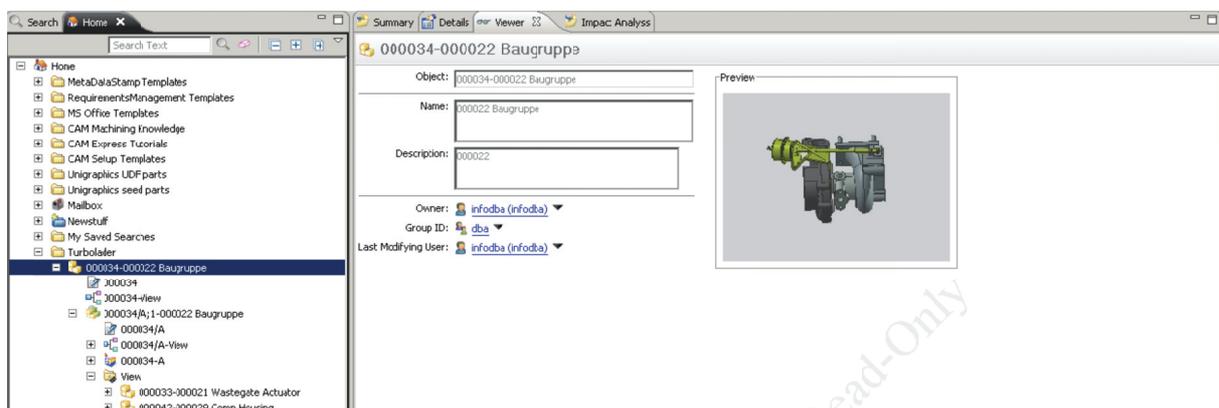


Abbildung 74: In Teamcenter 8.3 angelegte Produktstruktur eines Abgasturboladers

Für jedes Strukturelement ist ein SIO angelegt. Die Werte für Masse und Material werden automatisch aus dem CAD-System übernommen.

Lösungsanalyse

Zur Beurteilung des CO₂-Wertes müssen alle SIO-Klassen instanziiert und mit Werten versehen werden (z.B. Fertigungsart für alle 12 Strukturelemente). Darüber hinaus muss ein Konstruktionsmodell erstellt werden. Dieses beinhaltet das Lebenswegmodell der vorliegenden Konstruktion über die Lebensphasen Produktion, Nutzung und End-of-Life im Bilanzierungswerkzeug GaBi. Abbildung 75 zeigt das übergeordnete Modell zur Verknüpfung der drei Phasen in GaBi.



Abbildung 75: Modell über alle Lebensphasen des Beispielproduktes in GaBi 6.0

Der Vorteil der Ökobilanzsoftware GaBi ist der Zugriff auf eine umfangreiche Datenbank mit einer Vielzahl von ausführlichen Prozessen. Trotz des Umfangs der Datenbank schränkt sie den Detaillierungsgrad der Ökobilanz ein, da nur eine Auswahl an Werkstoffen und Fertigungsverfahren zur Verfügung stehen. Für die Umsetzung im Rahmen des Anwendungsbeispiels dieser Arbeit werden Vereinfachungen getroffen, die bei der folgenden Beschreibung der Einzelmodelle benannt werden. Alle verwendeten Prozesse stammen aus der GaBi Professional Datenbank 2012.

Für die Produktionsphase wurden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Es findet keine Betrachtung von Materialgewinnung und Materialtransport statt.
- Es werden nur Produktionsprozesse und die dafür benötigten Energien in Form von Strom und Wärme betrachtet.
- Alle Hilfs- und Betriebsmittel wie bspw. Schmierfette, Wasser oder Druckluft werden nicht erfasst.
- Die Anzahl der Fertigungsverfahren ist durch Anpassung an das Beispiel eingeschränkt und bedingt durch den Umfang der GaBi Datenbank.

Abbildung 76 zeigt das mit GaBi 6.0 erstellte Modell für die Produktion eines Bauteils. Es wurden elf Prozesse verwendet, von denen acht Fertigungsverfahren sind. Diese stehen mittig untereinander. Die Auswahl der Prozeduren erfolgte nach Bedarf für das Anwendungsbeispiel. Auf der linken Seite stehen zwei Prozesse, die den Energiebedarf für die Pro-

duktionsprozesse liefern. Es wird abhängig vom Verfahren elektrischer Strom und / oder thermische Energie benötigt. Die Menge wird über die Werte der Datenbank und den Parameter für die Auswahl der Fertigungsmethode bestimmt. Diese Kenngröße kann die Werte null bis acht annehmen, wobei bei null kein Verfahren ausgewählt wird und bei den Ziffern eins bis acht jeweils das Verfahren aus den SIO. Auf der rechten Seite werden die Massen der Bauteile aufsummiert und können im übergeordneten Plan als Transportgut an die Nutzungsphase übergeben werden. Die Summe der Massen entspricht dem Wert des Parameters Masse des SIO.

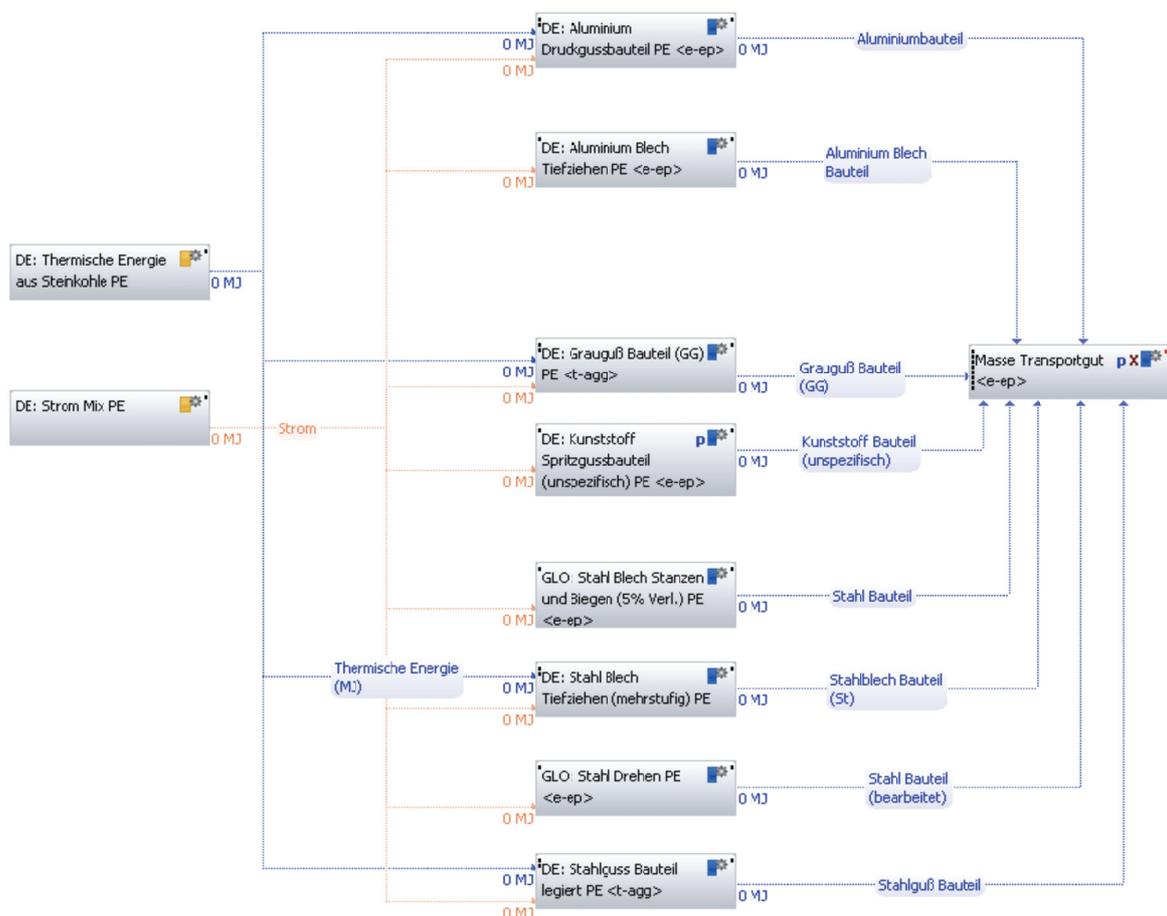


Abbildung 76: Modell für die Phase der Produktion in GaBi

Für die Nutzungsphase wurden folgende Vereinfachungen festgelegt:

- Die Nutzungsphase besteht nur aus Transportprozessen.
- Es gibt vier Transportmittel (Flugzeug, Schiff, LKW und Zug).
- Für die vier oben genannten Transportmittel sind Durchschnittswerte angenommen.
- Alle Hilfsmittel wie bspw. Schmierfette, Wasser oder Druckluft werden nicht erfasst.

In Abbildung 77 ist das Modell für die Nutzungsphase des Bauteils dargestellt. Die Prozesse sind ähnlich dem Produktionsplan angeordnet. Links befinden sich die Betriebsmittel, rechts

sind die vier möglichen Transportfahrzeuge aufgelistet. Die relevanten Parameter für diesen Plan sind die Entfernung, das Gewicht des Bauteils und die Auswahl des Fortbewegungsmittels. Die Variable für das Fortbewegungsmittel kann die Werte null bis 4 annehmen. Auch hier steht null für kein Transportmittel, während eins bis vier die zugeordneten Transportmittel aus dem entsprechenden SIO darstellen.

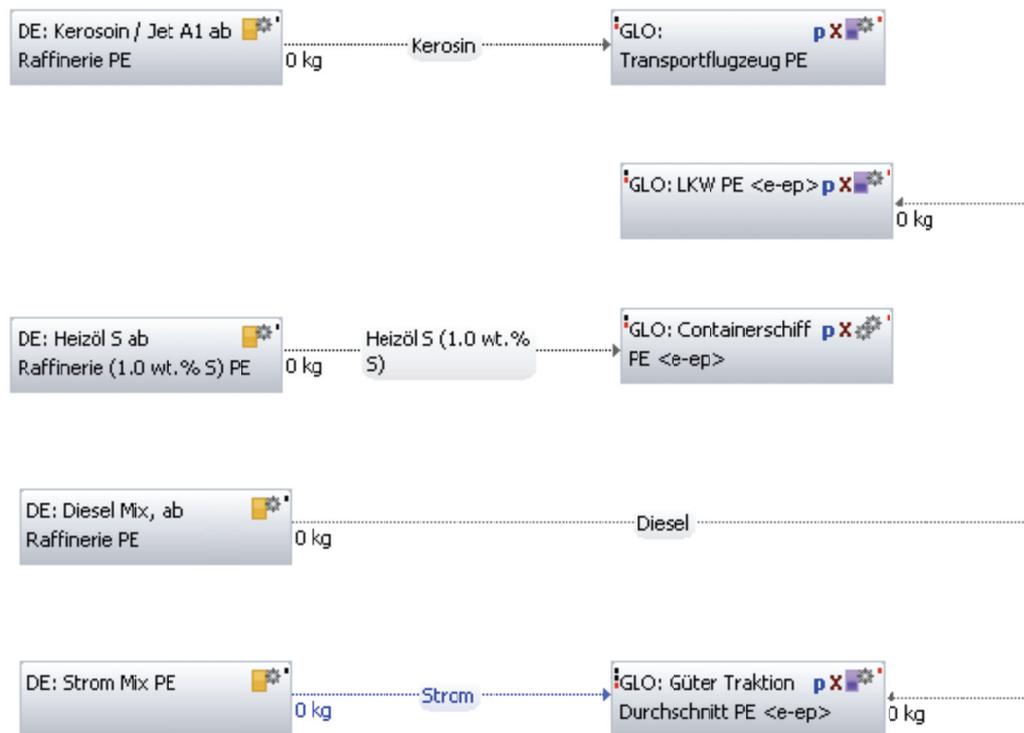


Abbildung 77: Modell für die Phase der Nutzung in GaBi

Die letzte Phase des Produktlebens ist das Lebensende (End-of-Life). Diese Phase wird aufgrund der geringen Anzahl gegebener Prozesse innerhalb der GaBi-Datenbank und wegen der vielen Möglichkeiten für den Verbleib des Bauteils nach der Nutzung, wie bspw. Recycling, Aufarbeitung oder Deponierung, hier sehr stark vereinfacht:

- Es findet keine Differenzierung des Lebensendes statt, alle Bauteile landen auf einer Deponie.
- Umwelteinflüsse des Transports zur Deponie werden nicht berücksichtigt.

Nachdem die Modelle erstellt wurden, können sie mithilfe des Tools GaBi2Teamcenter mit den Werten der SIO aus Teamcenter befüllt werden. Dies ermöglicht eine Ökobilanzierung des Produktes im Rahmen der angelegten Lebenswegmodelle. Es können verschiedene Konstruktionsentwürfe (z.B. unterschiedliche Geometrien) oder Konstruktionsmodelle (z.B. unterschiedliche Produktionsstandorte mit unterschiedlich langen Transportwegen zwischen den Lebensphasen) bewertet und miteinander verglichen werden. Exemplarisch werden im

Folgenden zwei verschiedene SIO Instanziierungen verändert und deren Auswirkungen dargestellt (Änderung der Werte für den Transportweg und der Produktmasse).

Änderung der Werte für den Transportweg

Zunächst werden im Bereich der Lösungsanalyse die Umweltauswirkungen für zwei Varianten des Transportwegs des Turbinenrades bestimmt. Dabei gilt die Annahme, dass der Turbolader an zwei verschiedenen Produktionsstandorten hergestellt werden kann und dann zum Nutzungsort transportiert werden muss. In diesem Zusammenhang soll aus ökologischer Sicht eine Entscheidung darüber getroffen werden, welcher Produktionsstandort infrage kommt. Die Parameter für Variante 1 sind die Herstellung aus Aluminium-Druckguss und ein Transport in der Nutzungsphase über eine Distanz von 100 km mit einem Lastkraftwagen (LKW). In Variante 2 wird nur der Parameter für die Distanz von 100 auf 5000 km erhöht. Diese Werte werden in die jeweiligen SIO-Formulare in Teamcenter eingegeben. Mithilfe des Werkzeugs GaBi2Teamcenter können die SIO-Informationen in GaBi importiert werden. Abbildung 78 und Abbildung 79 zeigen den Import für Variante 1 und 2.



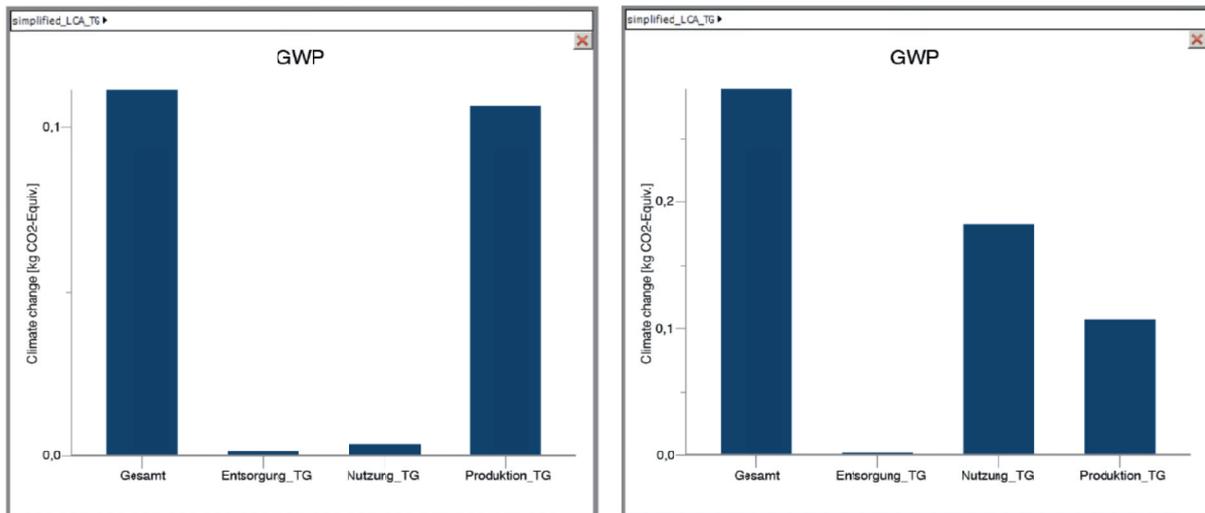
Abbildung 78: Ansicht des Parameterimportfensters in GaBi 6.0 für Variante 1



Abbildung 79: Ansicht des Parameterimportfensters in GaBi 6.0 für Variante 2

In Abbildung 80 werden die Ergebnisse für die drei Phasen des Produktlebenszyklus der Varianten 1 und 2 gegenübergestellt. Die Einteilung der y-Achse kann systembedingt nicht angepasst werden und ist immer auf den Gesamtwert skaliert. Der Gesamtwert ist der erste

der vier Balken, gefolgt von Entsorgungs-, Nutzungs- und Produktionsphase. Der Einfluss der Distanz bezieht sich nur auf die Phase der Nutzung, weshalb Produktion und Entsorgung in Abbildung 80 a) und b) gleich groß sind.



(a) Transportweg 100 km per LKW, hergestellt mit Aluminium Druckguss (Variante 1)

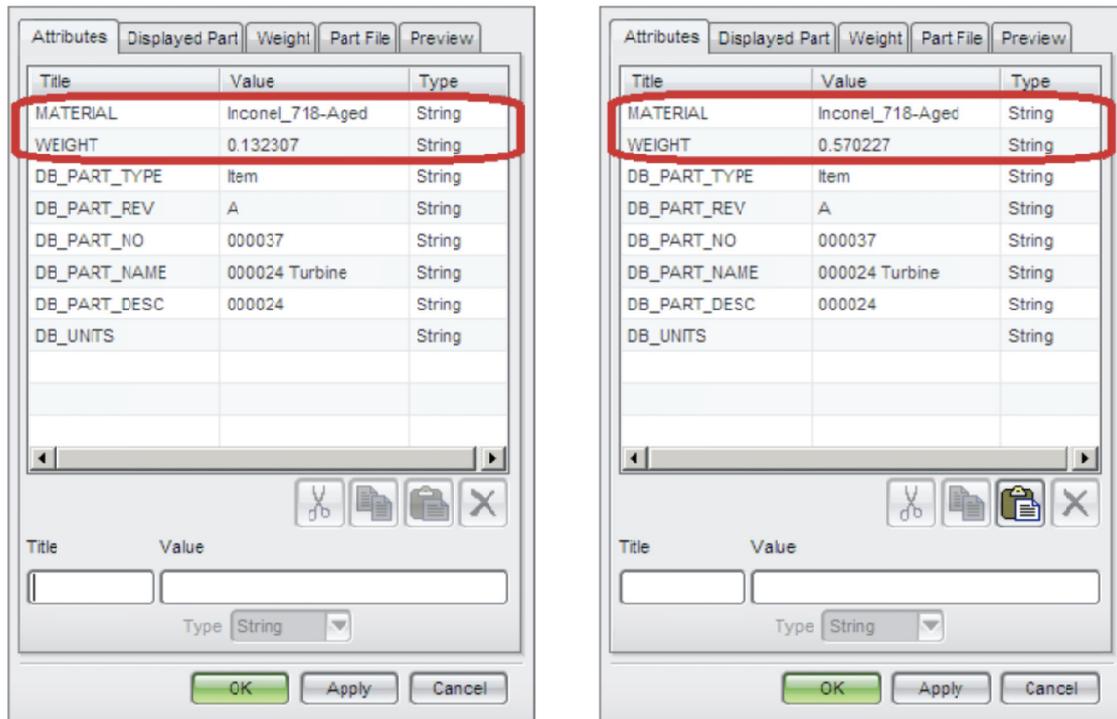
(b) Transportweg 5000 km per LKW, hergestellt mit Aluminium Druckguss (Variante 2)

Abbildung 80: Vergleich des Ergebnisses der Lebenszyklusanalysen für Varianten 1 (a) und 2 (b)

Das Ergebnis ist plausibel, da durch den höheren Transportweg von Variante 2 im Vergleich zu Variante 1 der CO₂-Wert in der Nutzungsphase höher ist: Längere Transportwege erhöhen den CO₂-Wert. Die Ergebnisse der Berechnung in GaBi können über das Werkzeug GaBi2Teamcenter wieder in Teamcenter bereitgestellt werden. Anwender des PDM-Systems können somit das Ergebnis einsehen.

Änderung der Werte für die Produktmasse

Das vorangegangene Beispiel zeigt: Die prototypische Umsetzung funktioniert und liefert plausible Ergebnisse. Eine weiterreichende Konsequenz für die Umweltbewertung von Produkten ist die Änderung der Masse des Produktes. An dieser Stelle wird daher im Konstruktionsentwurf die Geometrie des Produktmodells im CAD-System geändert. Es entstehen zwei verschiedene Varianten (1 und 3), die miteinander verglichen werden sollen. Durch die unterschiedlichen Geometrien entstehen auch unterschiedliche Massen der Varianten. An dieser Stelle wird die Veränderung der Masse des Turbinenrads im Vergleich von Variante 1 zu 3 angeführt.



(a) Variante 1

(b) Variante 3

Abbildung 81: Vergleich der Attributlisten der Bauteilvarianten des Turbinenrades in NX 7.5 für Variante 1 und 3

Abbildung 81 zeigt die zwei Attributlisten in NX 7.5 für die beiden Bauteilvarianten 1 und 3 des Turbinenrades. In Variante 3 wurde das Turbinenrad geometrisch verändert, so dass sich die Masse erhöht hat. Die Attributliste zeigt den Parameter als „WEIGHT“ an. Die Masse hat sich von ca. 132g auf ca. 570g erhöht. Beide Informationen werden ebenfalls in das jeweilige SIO in Teamcenter abgelegt. Das weitere Vorgehen ist wie im vorhergehenden Beispiel. In Abbildung 82 wird der Parameterimport für Variante 3 gezeigt. Anhand der fett hervorgehobenen Zeile, lässt sich erkennen, dass sich tatsächlich nur die Masse verändert hat.

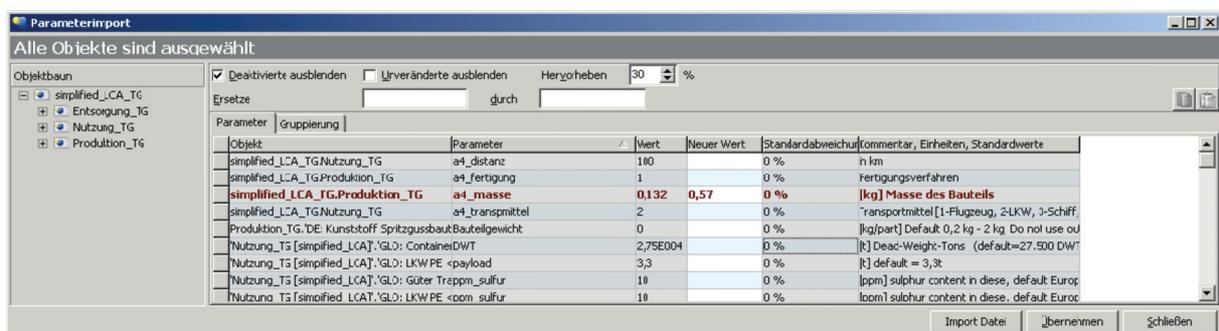
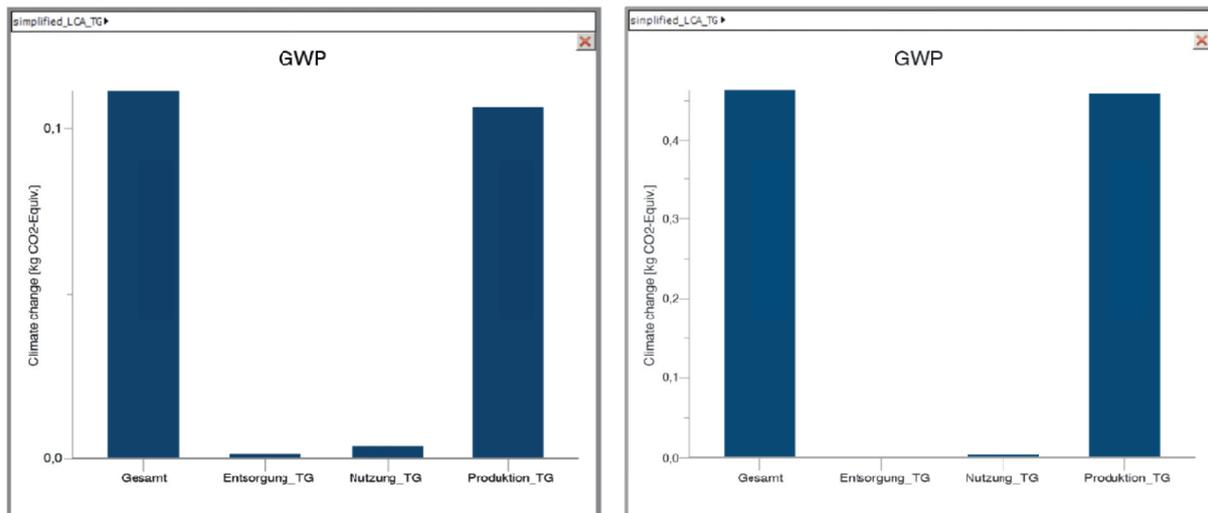


Abbildung 82: Ansicht des Parameterimportfensters in GaBi 6.0 für Variante 3

Die Durchführung der Ökobilanzierung erfolgt mithilfe der GaBi-Software und der darin angebotenen Datenbanken. Das Ergebnis zeigt Abbildung 83. Es lässt sich erkennen, dass der Gesamt-CO2-Ausstoß für Variante 3 erhöht ist. Die Erhöhung des CO2-Ausstoßes erfolgt

hauptsächlich in der Produktionsphase; er lässt sich mit einem erhöhten Energiebedarf für die Fertigung erklären. Eine leichte Erhöhung des CO₂-Ausstoßes erfolgt auch in der Nutzungsphase, da die gewählten Transportmittel mehr Gewicht transportieren müssen. Da das Bauteilgewicht nur um knapp 440g gestiegen ist, lässt sich die Erhöhung jedoch in der Nutzungsphase kaum erkennen.



(a) Transportweg 100 km per LKW, hergestellt mit Aluminium Druckguss, Ausgangsgeometrie (Variante 1)

(b) Transportweg 100 km per LKW, hergestellt mit Aluminium Druckguss, geänderte Geometrie mit erhöhter Masse (Variante 3)

Abbildung 83: Vergleich des Ergebnisses der Lebenszyklusanalysen für Varianten 1 (a) und 3 (b)

Die Ergebnisse der Berechnung in GaBi können über das Werkzeug GaBi2Teamcenter in Teamcenter bereitgestellt werden. Auch hier können Anwender des PDM-Systems somit das Ergebnis einsehen und bekommen eine direkte Rückmeldung über die Umweltauswirkungen ihrer Konstruktionsvarianten.

9.5 Auswertung und Fazit

Anhand der vorgestellten anwendungsfähigen Vorgehensweise und deren prototypischer Umsetzung wurde gezeigt, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte prototypische Lösung durch das Wechselspiel zwischen Analyse und Synthese auf der operativen Unternehmensebene dazu beitragen kann, nachhaltige Produkte zu entwickeln. Die entwickelte Lösung ermöglicht das frühe Beurteilen von Umweltauswirkungen verschiedener Produktvarianten im Entwicklungsprozess. Ihr Umfang erstreckt sich auf die beiden Regelkreise der Konstruktion und Bewertung zur Entwicklung nachhaltiger Produkte (vgl. Kapitel 7.6) und berücksichtigt, wie in Kapitel 7 gefordert, alle vier Ebenen (Prozess und Organisation, Entwicklungsaktivitäten und -methoden, Informationstechnologien und Werkzeuge, Informationsar-

tefakte und -standards) der operativen Unternehmensebene. Darüber hinaus werden die in Kapitel 9.1 formulierten Anforderungen erfüllt:

- Der Transfer von Produktparametern und Nachhaltigkeitsinformationen erfolgt automatisiert: Über die SIO, die in die beschriebene Systemlandschaft integriert sind, und die Entwicklung des Werkzeugs GaBi2Teamcenter kann sowohl Produktwissen als auch Nachhaltigkeitswissen automatisiert ausgetauscht und weiterverarbeitet werden.
- Produktinformationen stammen aus einer zentralen Datenbasis: Die SIO im PDM-System Teamcenter bieten eine zentrale Datenbasis, in der produkt- und nachhaltigkeitsbezogenes Wissen abgelegt und abgerufen werden kann.
- Durch die zentral gelegenen und standardisierten SIO und damit verbunden durch die Möglichkeit der Revisionierung und Wieder- sowie Weiterverwendung dieser wird der Aufwand zur Informationsbeschaffung reduziert.
- Durch die Kopplung der SIO an Produktstrukturelemente ist ein eindeutiger Bezug zwischen Produktkomponenten und Nachhaltigkeitsinformationen hergestellt.
- Der Transfer von Beurteilungsergebnissen erfolgt automatisiert. Über das Werkzeug GaBi2Teamcenter wird ein Transfer der Ergebnisse aus der Lebenszyklusanalyse in das PDM-System Teamcenter in ein entsprechendes SIO sichergestellt.

Die prototypische Lösung stellt somit einen zusammenhängenden Kontext dar, über den ein wesentlicher Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Produkte, und damit zum Umsetzen des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung, geleistet werden kann. Die Lösungen, die für die vier Ebenen bereitgestellt werden, sind integrativ.

10 Zusammenfassung und Zukunftsperspektiven

Die vorliegende Arbeit zielt auf die Integration des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung in produzierende Unternehmen ab. Sie greift die Frage auf, wie produzierende Unternehmen dazu befähigt werden können, nachhaltige Produkte hervorzubringen. Der Verantwortungsbereich der Produktentwicklung wird dabei über den gesamten Lebensweg des Produktes angelegt. Er schließt somit die Erfüllung von Nachhaltigkeitsforderungen aus den einzelnen Lebensphasen ein. Die im Rahmen dieser Arbeit konzipierte und exemplarisch umgesetzte Vorgehensweise zur Entwicklung nachhaltiger Produkte unterstützt Produktentwicklerinnen und -entwickler gezielt darin, ihrer Verantwortung für eine nachhaltige Entwicklung nachzukommen und Produkte über den gesamten Lebensweg ressourcenschonend, umweltfreundlich und sozialverträglich zu gestalten. Zugleich macht sie den Einfluss deutlich, den die Produktentwicklung auf die Nachhaltigkeit eines Produktes hat.

Die Entwicklung der neuen Vorgehensweise EnBeKo (Entscheidungs-, Bewertungs- und Konstruktionsregelkreis zum Entwickeln nachhaltiger Produkte) basiert auf umfangreichen Analysen sowohl zum wissenschaftlichen Forschungsbedarf als auch zum industriellen Handlungsbedarf. Diese Analysen zeigen, dass Unternehmen bezüglich des Themas Nachhaltigkeit auf normativer und strategischer Unternehmensebene die Herausforderungen erkannt haben, auf der operativer Unternehmensebene der Produktentwicklung jedoch noch Lösungen benötigen. Darüber hinaus machen die Analysen deutlich: Prozess und Organisation, Entwicklungsaktivitäten und -methoden, Informationstechnologien und Werkzeuge sowie Informationsartefakte und -standards müssen stets integrativ betrachtet und deren ideales Zusammenspiel beschrieben und gewährleistet werden. Vor diesem Hintergrund wird mit dieser Arbeit das neue EnBeKo-Vorgehensmodell vorgeschlagen, das so genannte Regelkreise zur Verbesserung der Konstruktion, zur verbesserten Bewertung des Konstruktionsmodells und letztendlich zur verbesserten Entscheidungsfindung beinhaltet. Die in diesem Zusammenhang formulierten Forschungsfragen lauten:

1. Prozess und Organisation: Wie müssen Nachhaltigkeitsforderungen im Unternehmen kommuniziert werden und wie werden diese an Verantwortliche in der Produktentwicklung herangetragen?
2. Entwicklungsaktivitäten und -methoden: Welche Aktivitäten werden durchgeführt und welche Methoden benötigen Entwicklungsingenieure, um nachhaltige Entscheidungen treffen zu können?
3. Informationstechnologien und Werkzeuge: Welche Informationstechnologien und Werkzeuge können in welchem Zusammenhang die Produktentwicklungsaktivitäten unterstützen?
4. Informationsartefakte und -standards: Welche Informationsartefakte und -standards müssen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte erstellt werden und wie können (Nachhaltigkeits-) Informationen sinnvoll vernetzt werden?

Die Antworten, die die vorliegende Arbeit auf diese Forschungsfragen findet, lassen sich in die folgenden Forderungen zur Entwicklung nachhaltiger Produkte überführen:

1. Prozess und Organisation: Nachhaltigkeitsforderungen müssen im Unternehmen kommuniziert und in Meilensteinzielen ausgedrückt werden; Nachhaltigkeitsziele und -forderungen müssen durchgängig für alle Unternehmensebenen sichtbar sein.
2. Entwicklungsaktivitäten und -methoden: Aus bestehenden Entwicklungsmethoden müssen praxistaugliche Entwicklungsmethoden eruiert, weiterentwickelt und validiert werden, damit das unternehmerische Risiko beim Einsatz reduziert wird. Darüber hinaus muss die methodische Unterstützung des operativen Entwicklungsprozesses produktspezifisch angepasst werden können, um Entscheidungen für den Lebenszyklus adäquat treffen zu können.
3. Informationstechnologien und Werkzeuge: Lösungsansätze des Lebenszyklusdenkens und -managements müssen in bestehende informationstechnische Systemlandschaften von Unternehmen integriert werden. Außerdem müssen die informationstechnischen Systeme so erweitert bzw. angepasst werden, dass detaillierte Abschätzungen auf die Nachhaltigkeit des Produktes erlaubt und, darauf aufbauend, verschiedene Produktalternativen bewerten werden können.
4. Informationsartefakte und -standards: Es müssen informationstechnische Artefakte (weiter-) entwickelt werden, die lebenszyklusorientierte Nachhaltigkeitsinformationen zu Produkten und Prozessen beinhalten. Die informationstechnischen Artefakte müssen untereinander und mit den verschiedenen Produktmodellen, die im Entwicklungsprozess entstehen, verknüpft werden können.

Das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung umfassend in produzierende Unternehmen, speziell in die Entwicklung nachhaltiger Produkte, zu integrieren, erfordert ein sukzessives Vorgehen unter Berücksichtigung der Schritte: Sensibilisierung, Bewertung und Vergleich, Einschränkung des Lösungsraums und Simulation. Einzelne Lösungen hierzu wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellt und (weiter-) entwickelt. Auf ihrer Grundlage lassen sich folgende weiterführende Forschungs- und Handlungsfelder skizzieren:

- Sensibilisierung: Nachhaltigkeit ist eine gesellschaftliche Aufgabe, die auch im Rahmen der Produktentwicklung übernommen werden muss. Leitbilder, Prinzipien und Richtlinien müssen in den Unternehmen mit Bezug zum Entwicklungsvorgehen weiter aufgebaut und geschult werden. Die Grundlagen bilden dabei schon die Ausbildung und Hochschulbildung, in deren Lehrkonzepte das Thema Nachhaltigkeit jedoch noch stärker integriert werden muss.
- Bewertung und Vergleich: Die Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten ist mit verfügbaren Methoden und Werkzeugen möglich. Diese müssen jedoch stetig weiterentwickelt werden. Dabei sollten alle Dimensionen der Nachhaltigkeit gleichermaßen Berücksichtigung finden. Entwicklungsprozesse und ihre Organisation in produzierenden Unternehmen müssen auch Konstruktionsänderungen zulassen können, sowohl bei gleichbleibender als auch bei verbesserter Wirtschaftlichkeit. Gleiches gilt für die technische Lösung.
- Einschränkung des Lösungsraums: Auf Basis von Wissenszuwachs (neues Wissen und Verknüpfung von existierendem Wissen) über die Entwicklung nachhaltiger Produkte sollte der Lösungsraum für die Konstruktion so früh wie möglich eingeschränkt werden. Neue Informationstechnologien im Bereich von Big Data, Smart Data, Open Innovation und Crowd Sourcing stellen hierzu ein großes Potential dar. Diese können in der Entwicklung genutzt werden, um Merkmale und Eigenschaften von Produkten schon in den frühen Phasen der Entwicklung nachhaltig zu gestalten.
- Simulation: Die Abbildung eines zu entwickelnden Produkts in seiner zukünftigen Umgebung (gesamter Lebenszyklus bzw. Wertschöpfungsnetzwerk) ermöglicht es, nachhaltige Entscheidungen für das spätere reale Produkt zu treffen. Die neuen Entwicklungen im Rahmen von Cyber Physical Systems, Industrie 4.0 und Smart Systems können die virtuelle Simulation von Szenarien weiter befördern. Das Potential dieser Technologien gilt es auszuloten.

Letztendlich können auf Nachhaltigkeit angelegte Anstrengungen in der Produktionstechnik und im Speziellen in der Produktentwicklung nur fruchten, wenn sie in einen gesellschaftlichen Wandel hin zu einer nachhaltigen Verantwortung eingebunden sind. In diesem Rahmen

zeigt die vorliegende Arbeit auf, welchen Beitrag produktionstechnische Ansätze in der Entwicklung von Produkten zum gesellschaftlich motivierten Thema einer nachhaltigen Entwicklung leisten können.

11 Literatur- und Quellenverzeichnis

- Abele et al. 2008 Abele, E.; Anderl, R.; Birkhofer, H.; Rüttinger, B. (Hrsg.): EcoDesign - Von der Theorie in die Praxis. Springer, Berlin Heidelberg, 2008.
- Abramovici et al. 2010 Abramovici, M.; Ballalouna, F.; Neubach, M.: Delphi-Studie PLM 2020: Experteneinschätzungen zur zukünftigen Entwicklung des Product Lifecycle Managements. *Industrie Management* (3), 47-50, 2010.
- Alonso 2006 Alonso García, M.: La Norma de ecodiseño UNE1503001, CONAMA, Congreso Nacional del Medio Ambiente, en los retos del desarrollo sostenible en España, Madrid, 2006.
- Ameta 2009 Ameta, G.: Design for Sustainability: Overview and Trends. Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED'09, 24-27 August 2009, Stanford University, Stanford, CA, USA, 2009.
- Aoe 2007 Aoe, T.: Eco-efficiency and ecodesign in electrical and electronic products. *Journal of Cleaner Production*, 15:1406-1414, 2007.
- Auger und Devinney 2007 Auger, P.; Devinney, T.M.: Do what consumers say matter? The misalignment of preferences with unconstrained ethical intentions. *Journal of Business Ethics*, 76(4), 361-383, 2007.
- Azapagic et al. Azapagic, A.; Emsley, A.; Hamerton, I.: *Polymers: The environment and sustainable development*; Wiley, West Sussex, 2003.
- Bala et al. 2010 Bala, A.; Raugei, M.; Benveniste, G.; Gazulla, C.; Fullana, P. Pere A.: Simplified tools for global warming potential evaluation: when 'good enough' is best. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 15 (5), 489-498, 2010.
- Bartmann 2001 Bartmann, H.: Substituierbarkeit von Naturkapital. In: Held, M., Nutzing, H. G. (Hrsg.): *Nachhaltiges Naturkapital: Ökonomik und zukunftsfähige Entwicklung*. Campus Verlag, Frankfurt am Main, 2001.

- Baumann et al. 2002 Baumann, H.; Boons, S.; Bragd, A.: Mapping the green product development field: engineering, policy and business perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 10:409-415, 2002.
- Bhamra 2004 Bhamra, T. A.: Ecodesign: the search for new strategies in product development. *Journal of Engineering Manufacture*, 218:557-569, 2004.
- Bhamra und Loft-house 2007 Bhamra, T.; Lofthouse, V.: *Design for Sustainability: A Practical Approach*. Routledge, London New York, 2007.
- BImSchG 2013 Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 2. Juli 2013 (BGBl. I S. 1943) geändert worden ist. Online verfügbar unter: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimSchg/gesamt.pdf>, Zugriff am 16.12.2013.
- Birch et al. 2012 Birch, H.; Hon, K.; Short, T.: Structure and output mechanisms in Design for Environment (DfE) tools. *Journal of Cleaner Production*, 35:50-58, 2012.
- Birkhofer und Waeldele 2008 Birkhofer, H.; Waeldele, M.: Properties and Characteristics and Attributes and ... - an Approach on Structuring the Description of Technical Systems. AEDS 2008 Workshop, 31 October – 1 November 2008, Pilsen - Czech Republic, 2008.
- Blake 1999 Blake, J.: Overcoming the value-action gap in environmental policy: Tensions between national policy and local experience. *Local Environment*, 4(3), 257-278, 1999.
- Blessing und Chakrabarti 2009 Blessing, L.; Chakrabarti, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. Springer, 2009.
- BMBF 2014 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): *Die neue Hightech-Strategie Innovationen für Deutschland*. trigger.medien gmbh, Berlin, 2014.
- BMW 2013 BMW Group: *Fakten zum Unternehmen. Nachhaltigkeit*. Online verfügbar unter: http://www.bmwgroup.com/d/0_0_www_bmwgroup_com/investor_relations/fakten_zum_unternehmen/nachhaltigkeit.html, Zugriff am 02.04.2013.
- BMWi 2016 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *EU-Ökodesign-Richtlinie für eine umweltgerechte Gestaltung von Produkten*. Online verfügbar unter: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Industrie/Industrie-und-Umwelt/oekodesignrichtlinie,did=636236.html>, Zugriff am 26.02.2016.

- Boks und Pascual 2004 Boks, C.; Pascual, O.: The Role of Success Factors and Obstacles in Design for Environment: A Survey Among Asian Electronics Companies. International Symposium on Electronics and the Environment, 208-213, 2004.
- Borchardt et al. 2011 Borchardt, M.; Wendt, M. H.; Pereira, G. M.; Sellitto, M. A.: Redesign of a component based on ecodesign practices: environmental impact and cost reduction achievements. Journal of Cleaner Production, 19:49-57, 2011.
- Bovea und Pérez-Belis 2012 Bovea, M. D.; Pérez-Belis, V.: A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process. Journal of Cleaner Production, 20:61-71, 2012.
- Buchert et al. 2013 Buchert, T.; Halstenberg, F.; Kaluza, A.: Identifikation und Analyse von Informationsobjekten bei der Anwendung von Methoden zur Entstehung von nachhaltigen Produkten. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Fachgebiet Industrielle Informationstechnik, Berlin, 2013. (unveröffentlicht)
- Buchert et al. 2014 Buchert, T.; Halstenberg, F.; Adolphy, Sebastian; Lindow, K.; Stark, R.: Wissensbasierte nachhaltige Produktentwicklung - Systematische Auswahl und Kombination von Methoden zur Entscheidungsunterstützung. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hg.): Design for X - Beiträge zum 25. DfX-Symposium Oktober 2014. Design for X Symposium, Bamberg, 07.10.2014-08.10.2014. 285-296, TuTech Verlag, Hamburg, 2014.
- Byggeth et al. 2007 Byggeth, S.; Broman, R.: A method for sustainable product development based on a modular system of guiding questions. Journal of Cleaner Production, 15:1-11, 2007.
- Calderón et al. 2009 Calderón, A. F.; Borja, V.; López Parra, M.; Ramírez Reivich, A. C.: A Conceptual Taxonomy Study of Sustainable Product Design Processes. Proceedings of the ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2009-13088, November 13-19, Lake Buena Vista, Florida, USA, 2009.
- Chiotellis et al. 2008 Chiotellis, S.; Kernbaum, S.; Seliger, G.: Remanufacturing process planning for IT equipment. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 1-6, 2008.
- Ciroth et al. 2013 Ciroth, A.; Theret, J.-P.; Fliegner, M.; Srocka, M.; Bläsing, V.; Duyan, Ö.: Integrating life cycle assessment tools and information with product life cycle management / product data management GreenDelta / Dassault 3DS / pernexas. Global Conference on Sustainable Manufacturing, GCSM 2013, 21.09.2013 - 23.09.2013, Berlin, 2013.

- Collado-Ruiz und Ostad-Ahmad-Ghorabi 2013 Collado-Ruiz, D.; Ostad-Ahmad-Ghorabi, H.: Estimating Environmental Behavior Without Performing a Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 17:31–42, 2013.
- Crul und Diehl 2009 Crul, M. R.; Diehl, J. C.: Design for Sustainability. A practical approach for developing economies. UNEP, Division of Technology, Industry and Economics. Delft University of Technology, Delft, 2009.
- Dalal-Clayton und Sadler 2014 Dalal-Clayton B.; Sadler, B.: Sustainability Appraisal: A Sourcebook and Reference Guide to International Experience. Taylor und Francis, New York, 2014.
- Daly 1996 Daly, H. E.: Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development. Beacon Press, Boston, 1996.
- Deloitte 2013 Deloitte Global Services Limited: GRI veröffentlicht G4-Richtlinien. Online verfügbar unter: <http://www.iasplus.com/de/de/news/2013/mai/gri>, Zugriff am 24.05.2013.
- Deutscher Bundestag 1998 N.N: Konzept Nachhaltigkeit – Vom Leitbild zur Umsetzung. Deutscher Bundestag 13. Wahlperiode. Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“, Berlin, 26.06.1998.
- Devanathan 2010 Devanathan, S.: Integration of Sustainability into Early Design through the Function Impact Matrix. *Journal of Mechanical Design*, 132:081004-1, 2010.
- Diekmann und Rosenthal 2014 Diekmann, B.; Rosenthal, E.: Energie: Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014.
- DIN 2009 Deutsches Institut für Normung DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. 2009.
- ECOLIFE 2013 ECO-Life: Sustainable zero carbon ECO-town developments improving quality of life across EU. Online verfügbar unter: <http://www.ecolife-project.eu>, Zugriff am 02.08.2013.
- EG 1907/2006 Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18.12.2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission. Veröffentlicht am 30.12.2006 (Abl. L 396 S. 1), Inkrafttreten seit 1. Juni 2007.

- Ehrlenspiel et al. 2013 Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Springer, Berlin Heidelberg, 2013.
- Eigner 2014 Eigner, M.: Product Lifecycle Management (PLM). In: Eigner, M.; Roubanow, D.; Zafirov, R. (Hrsg.): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2014.
- Eigner und Stelzer 2009 Martin E.; Ralph S.: Product Lifecycle Management – Ein leitfaden für Product Development und Lyfe Cycle Management. 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
- Endris et al. 2011 Endris, K.; Taisch, M.; Terzi, S.: Integration of sustainability in NPD process: Italian Experiences. International Conference on Product Lifecycle Management 2011, PLM2011, Eindhoven, 2011.
- Epstein und Roy 1998 Epstein, M.; Roy, M.-J.: Managing Corporate Environmental Performance – A Multinational Perspective. European Management Journal, 16(3):284-296, Elsevier, 1998.
- Erhard 2009 Ludwig E.: Wohlstand für alle. Bearbeitet von Wolfram Langer, Anaconda Verlag, Köln, 2009.
- Fan et al. 2013 Fan, S.-K. S.; Fan, C.; Yang, J.-H.; Liu, K. F.-R: Disassembly and recycling cost analysis of waste notebook and the efficiency improvement by re-design process. Journal of Cleaner Production, 39(0):209–219, 2013.
- FAZ 2013 Franffurter Allgemeine Zeitung Online: Autoindustrie bittet Kanzlerin um Hilfe. Online verfügbar unter: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/eu-fordert-dreiliterauto-autoindustrie-bittet-kanzlerin-um-hilfe-12189219.html>, Zugriff am 22.05.2013.
- Feldmann et al. 1999 Feldmann, K.; Meedt, O.; Trautner, S.; Scheller, H.; Hoffmann; W.: The "Green Design Advisor": A Tool For Design For Environment. Journal of Electrics Manufacturing, 09(01):17-28, 1999.
- Ferguson 2014 Ferguson, K. E.: An Investigation of Sustainable Product Purchase Behavior: A Social Cognitive Perspective of Consumer Action. DigitalCommons@Kennesaw State University, Kennesaw, 2014.
- Feschet et al. 2013 Feschet, P.; Macombe, C.; Garrabé, M.; Loillet, D.; Saez, A. R.; Benhmad, F.: Social impact assessment in LCA using the Preston pathway. International Journal of Life Cycle Assessment, 18(2):490–503, 2013.

- Finch und Ward 1996 Finch, W.W.; Ward, A.C.: Quantified relations: a class of predicate logic design constraint among sets of manufacturing, operating and other variations. ASME Design Engineering Technology Conference, 18–22, 1996.
- Finch und Ward 1997 Finch, W.W.; Ward, A.C.: A set-based system for eliminating infeasible design in engineering dominated by uncertainty. ASME Design Engineering Technology Conference, 1997.
- Finkbeiner et al. 2006 Finkbeiner, M; Hoffmann, R; Ruhland, K.; Liebhart, D.; Stark, B.: Application of Life Cycle Assessment for the Environmental Certificate of the Mercedes-Benz S-Class. The International Journal of Life Cycle Assessment, 11(4):240-246, 2006.
- Finkbeiner et al. 2010 Finkbeiner, M.; Schau, E. M.; Lehmann, A.; Traverso, M.: Towards Life Cycle Sustainability Assessment. Sustainability 2(10):3309–3322, 2010.
- Fischbach 2007 Fischbach, K.: Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen: Analyse der Global Reporting Initiative (GRI). Diplomica Verlag, Bamberg, 2007.
- Ford 2007 Ford of Europe: Product Sustainability Index. Online verfügbar unter <https://corporate.ford.com/microsites/sustainability-report-2013-14/doc/sr13-ford-psi.pdf>, Zugriff am 14.05.2016.
- Frad und Revnic 2007 Frad, A.; Revnic, I.: Prodtect Automotive – Meeting the Requirements of Elv. In: Proceedings of ICED 2007, 16th International Conference on Engineering Design, 28.07.2007-31.07.2007, 225–232, Paris, France.
- GaBi 2016 thinkstep GaBi: Ganzheitliche Bilanzierung. Online verfügbar unter <http://www.gabi-software.com>, Zugriff am 01.03.2016.
- Graedel und Allenby 2003 Graedel, T. E.; Allenby, B. R.: Industrial ecology. 2. Aufl. Upper Saddle River NJ u.a: Prentice Hall, 2003.
- GRI 2006 GRI (Global Reporting Initiative): GRI-Anwendungsebenen. Version 3.0. Global Reporting Initiative. Online verfügbar unter: <https://www.globalreporting.org/Pages/resource-library.aspx>, Zugriff am 21.07.2006.
- GRI 2013a GRI (Global Reporting Initiative): Leitlinien zur Nachhaltigkeitsberichterstattung - Berichterstattungsgrundsätze und Standardangaben. Global Reporting Initiative, Amsterdam, 2013.
- GRI 2013b GRI (Global Reporting Initiative): Sustainability Disclosure Database. Online verfügbar unter <http://database.globalreporting.org/search>, Zugriffe am 01.09.2013 und 02.08.2014.

- GRI 2014 GRI (Global Reporting Initiative): Sustainability Disclosure Database. Online verfügbar unter: <http://database.globalreporting.org/reports/view/20830>, Zugriff am 17.08.2014.
- Grober 1999 Grober, U.: Der Erfinder der Nachhaltigkeit. In: Die Zeit Nr. 48, S. 98, 25.11.1999.
- Großmann et al. 2008 Großmann, J.; Hansen, S.; Melzer, L.; Günther, J.: EuP-Implementierung. Teilprojekt C1. In: Abele, E.; Anderl, R.; Birkhofer, H.; Rüttinger B. (Hrsg.): EcoDesign. Von der Theorie in die Praxis. Springer, Berlin New York, 2008.
- Grundwald und Kopfmüller 2006 Grunwald, A.; Kopfmüller, J.: Nachhaltigkeit. Campus Verlag GmbH, Frankfurt/Main, 2006.
- Guinée et al. 2011 Guinée, J. B.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Zamagni, A.; Masoni, P.; Buonamici, R.: Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. In: Environment Science Technology, 45(1):90–96, 2011.
- Haberfaellner und Daenzer 2002 Haberfaellner, Daenzer, W. F.: Systems Engineering. In: Daenzer, W. F.; Huber F.: Systems Engineering – Methodik und Praxis, Industrielle Organisation, 11. Auflage, Zürich, 2002.
- Hanusch 2011 Hanusch, D.: Die Entwicklung nachhaltiger Produkte – Theoretischer Anspruch und Möglichkeiten zur praktischen Umsetzung in der sozialen Dimension. Berichte aus dem Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt, VDI-Verlag, Darmstadt, 2011.
- Hauschild et al. 2004 Hauschild, M.Z.; Jeswie, J.; Altingl, L.: Design for Environment – Do we get the Focus Right?. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2004.
- Henkel 2013 Henkel: Nachhaltigkeitsstrategie 2030. Online verfügbar unter: <http://www.henkel.de/investor-relations/strategie-nachhaltigkeit-47248.htm>, Zugriff am 15.01.2013.
- Henry 2009 Henry, A. D.: The challenge of learning for sustainability: A prolegomenon to theory. Human Ecology Review, 16(2):131-140, 2009.
- Hermann et al. 2006a Hermann, C.; Leitner, T.; Paulesich, R.: Nachhaltigkeit in der Elektro(nik)industrie. Bd. VDI Reihe 16 Nr. 179, VDI Verlag, Düsseldorf, 2006.
- Herrmann 2009 Herrmann, C.: Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Springer, Berlin Heidelberg, 2009.

- Herrmann et al. 2006b Herrmann, C.; Frad, A.; Luger, T.; Krause, F.-L.; Ragan, Z.: Integrating End-of-Life Evaluation in Conceptual Design. In: Electronics and the Environment, 2006. Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 245–250, 2006.
- Herrmann et al. 2008 Herrmann, C.; Frad, A.; Luger, T.: Integrating the end-of-life evaluation and planning in the product management process. In: Progress in Industrial Ecology, an International Journal, 5(1):44–64, 2008.
- Holmberg 2000 Holmberg, J.: Backcasting from non-overlapping sustainability principles — a framework for strategic planning. International Journal of Sustainable Development and World, 7, 2000.
- Horne 2009 Horne, R. E.: Limits to labels: The role of eco-labels in the assessment of product sustainability and routes to sustainable consumption. International Journal of Consumer Studies, 33:175–182, 2009.
- Howarth und Hadfield 2006 Howarth, G.; Hadfield, M.: A sustainable product design model. Materials and Design, 27:10, 2006.
- IEA 2015 International Energy Agency: CO2 Emissions From Fuel Combustion. OECD/IEA, Paris, 2015.
- Inoue et al. 2010a Inoue, M.; Nahm, Y. E.; Okawa, S.; Ishikawa, H.: Design support system by combination of 3D-CAD and CAE with preference set-based design method. Journal of Concurrent Engineering, 18(7):41–53, 2010.
- Inoue et al. 2010b Inoue, M.; Lindow, K.; Stark, R.; Ishikawa, H.: Application of Sustainable Aspects to the Set-based Design Method. Proceedings of the 11th International Design Conference, DESIGN 2010, 17-20 May 2010, Dubrovnik, Croatia, 2010.
- Inoue et al. 2010c Inoue, M.; Lindow, K.; Stark, R.; Ishikawa, H.: Preference Set-Based Design Method for Sustainable Product Creation. In: Pokojski, J.; Fukuda, S.; Salwiński, J. (Hrsg.): New world situation. New directions in concurrent engineering. Proceedings of the 17th ISPE International Conference on Concurrent Engineering, 431–439, Springer, New York, 2010.
- Inoue et al. 2012 Inoue, M.; Lindow, K.; Stark, R.; Tanaka, K.; Nahm, Y.E.; Ishikawa, H.: Decision-making support for sustainable product creation. Journal of Advanced Engineering Informatics, 26:782–792, 2012.
- ISO 14006 ISO 14006:2011: Environmental management systems - Guidelines for incorporating ecodesign. International Organization for Standardization, Geneva, 2011.

- ISO/TR 14062 ISO/TR 14062: Environmental management—Integrating environmental aspects into product design and development. International Organization for Standardization, Geneva, 2002.
- Jansen 2006 Jansen, Maaike: Influences Upon Sustainable Product Development in the Developing World. United Nation Environment Programme, Working Group on Sustainable Product Development. Amsterdam, 2006.
- Jawahir et al. 2006 Jawahir, I. S.; Wanigarathne, P. C.; Wang, X.: Product Design and Manufacturing Processes for Sustainability. In: Mechanical Engineers Handbook: Manufacturing and Management, Volume 3, Third Edition, Wiley und Sons, 2006.
- Jensen et al. 1997 Jensen, A. A.; Elkington, J.; Christiansen, K.; Hoffmann, L.; Moller, B. T.; Schmidt, A.; van Dijk, F.: Life Cycle Assessment (LCA) – A guide to approaches, experiences and information sources. European Environment Agency, 1997.
- Jørgensen 2013 Jørgensen, A.: Social LCA—a way ahead? In: Internation Journal of Life Cycle Assessment, 18(2):296–299, 2013.
- Jørgensen et al. 2008 Jørgensen, A.; Bocq, A.; Nazarkina, L.; Hauschild, M.: Methodologies for social life cycle assessment. In: Internation Journal of Life Cycle Assessment, 13(2):96–103, 2008.
- Jun et al. 2009 Jun, H. B; Shin, J. H.; Kim Y. S.; Kiritsis, D.; Xirouchakis, P.: A framework for RFID applications in product lifecycle management. International Journal of Computer integrated Manufacturing, 22:595–615, 2009.
- Kirchner 2003 Kirchner, K.: Integrierte Unternehmenskommunikation. Theoretische und empirische Bestandsaufnahme und eine Analyse amerikanischer Großunternehmen. VS Verlag, Wiesbaden, 2003.
- Klauer 1998 Klauer, B.: Nachhaltigkeit und Naturbewertung. Welchen Beitrag kann das ökonomische Konzept der Preise zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit leisten?. Physica, Heidelberg, 1998.
- Klöpffer und Grahl 2009 Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA)., Wiley-VCH Verlag GmbH und Co. KGaA, Weinheim, 2009.
- Knight and Jenkins 2009 Knight, P.; Jenkins, J. O.: Adopting and applying eco-design techniques: a practitioners perspective. Journal of Cleaner Production, 17:549-558, 2009.
- Kölpin 2013 Kölpin, S.: Informations- und Planungssystem für nachhaltige Mobilität. In: Gómez, J. M.; Lang, C.; Wohlgemuth, V. (Hrsg.): IT-gestütztes Ressourcen- und Energiemanagement. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.

- KPMG 2013 KPMG: The KPMG Survey of Corporate responsibility reporting 2013. Publication number: 131018, Publication date: December 2013, Printed in the Netherlands, 2013.
- Lagerstedt 2003 Lagerstedt, J.: Functional and environmental factors in early phases of product development - Eco functional matrix. Maskinkonstruktion, Stockholm, 2003.
- Lin und Huang 2011 Lin, P.C.; Huang, Y.H.: The influence factors on choice behavior regarding green products based on the theory of consumption values. Journal of Cleaner Production, 22(1):11-18, 2011.
- Lindahl und Eker-
mann 2013 Lindahl, M.; Ekermann, S.: Structure for Categorization of EcoDesign Methods and Tools. Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 117-122, 17.04.2013-19.04.2013, Singapore, 2013.
- LML 2016 Lifecycle Modelling Language (LML): Life Cycle Modelling Language. Online verfügbar unter <http://www.lifecyclemodeling.org/spec>, Zugriff am 03.03.2016.
- Loveridge 2009 Loveridge, D.: Foresight: The Art and Science of Anticipating the Future. Routledge, New York, 2009.
- Lüskow und Heit-
mann 2010 Lüskow, H.; Heitmann, K.: Analyse der Umsetzung der Anforderungen von Artikel 7 unter REACH bei importierten Erzeugnissen. Ökopool, Umco, Hamburg, 2010.
- Luttrupp und La-
gerstedt 2006 Luttrupp, D. C.; Lagerstedt, J.: EcoDesign and the Ten Golden Rules: Generic Advice for Merging Environmental Aspects Into Product Development. Journal of Cleaner Production, 14:1396–1408, 2006.
- Lützkendorf et al.
2007 Lützkendorf, T.: Nachhaltigkeitsmanagement. In: Vierling, M. et al.: Managementleistungen im Lebenszyklus von Immobilien. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007.
- Masui et al. 2003 Masui, K.; Sakao, T.; Kobayashi, M.; Inaba, A.: Applying Quality Function Deployment to Environmentally Conscious Design. International Journal Quality Reliability Management, 20:90–106, 2003.
- McDonough und
Braungart 2009 McDonough, W.; Braungart, M.: Cradle to Cradle: Remaking the way we make things. Vintage, London, 2009.
- Meadows und
Meadows 1972 Meadows, D.; Meadows, D. L.: The Limits to Growth. Universe Books, New York, 1972.

- Millet et al. 2007 Millet, D.; Bistagnino, L.; Lanzavecchia, C.; Camous, R.; Poldma, T.: Does the potential of the use of LCA match the design team needs?. In: *Journal of Cleaner Production*, 15(4):335–346, 2007.
- Murtagh et al. 1999 Murtagh, N.; Bamba, T.; Iwama, K.: An evaluation tool for eco-design of electrical products. In: *Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 1999. *Proceedings EcoDesign '99*, 766–770, 1999.
- Naisbitt 1982 Naisbitt, J.: *Megatrends. Ten New Directions Transforming Our Lives*. Warner Books, 1982.
- Nidumolu et al. 2009 Nidumolu, R.; Prahalad, C. K.; Rangaswami, M. R.: Why Sustainability Is Now the Key Driver of Innovation. *Harvard Business Review*, 87(9):56-64, 2009.
- Nielsen und Wenzel 2002 Nielsen, P.; Wenzel, H.: Integration of environmental aspects in product development: a stepwise procedure based on quantitative life cycle assessment. In: *Journal of Cleaner Production* 10(3):247–257, 2002.
- Niemann et al. 2009 Niemann, J.; Schuh, G.; Baessler, E.; Eigner, M.; Stolz, M.; Steinhilper, R.: Management des Produktlebenslaufs. In: H.-J. Bullinger, D. Spath, H.-J. Warnecke und E. Westkämper (Hrsg.): *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung*. Springer, Berlin Heidelberg, 2009.
- NIES 2011 National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan: Sustainable Development Indicators Database. Online verfügbar unter http://www.nies.go.jp/sdi-db/search_e.php, Zugriff am 28.01.2011.
- Nonaka und Takeuchi 1995 Nonaka, I.; Takeuchi, H.: *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. Oxford University Press, 1995.
- Oberender 2006 Oberender, C.: *Die Nutzungsphase und ihre Bedeutung für die Entwicklung umweltgerechter Produkte*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2006.
- Oberender und Birkhofer 2004 Oberender, C.; Birkhofer, H.: The Eco-Value Analysis – An Approach To Assigning Environmental Impacts And Costs To Customers' Demands. In: Marjanovic, D. (Hg.): *Proceedings of the 8th International Design Conference, May 17-20, 2004, Dubrovnik, Croatia*. Zagreb, Glasgow: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. University of Zagreb, The Design Society, 2004.
- Ott und Döring 2011 Ott, K.; Döring, R.: *Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit*. Metropolis-Verlag, Marburg, 2011.

- Pahl et al. 2007 Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. 7. Auflage, Springer, Berlin, 2007.
- Petersen 2012 Petersen, S. I.: Profit from Design - leveraging design in business. Lulu.com, Kopenhagen, 2012.
- Pigosso et al. 2010a Pigosso, D.; Zanette, E. T.; Filho, A. G.; Ometto, A. R.; Rozenfeld, H.: Ecodesign methods focused on remanufacturing. Journal of Cleaner Production, 18:21-31, 2010.
- Pigosso et al. 2010b Pigosso, D.; Rozenfeld, H.; Seliger, G.: Ecodesign Maturity Model: criteria for methods and tools classification. CIRP Global Conference on Sustainable Manufacturing, 22.11.2010-24.11.2010, Abu Dhabi, 2010.
- Pommer und Bech 2003 Pommer, K.; Bech, P.: Handbook on Environmental Assessment of Products: Miljøstyrelsen. Environmental Project no. 813, Kopenhagen, 2003.
- Pucher und Zinner 2012 Pucher, H.; Zinner, K.: Aufladung von Verbrennungsmotoren - Grundlagen, Berechnungen, Ausführungen. Springer, Berlin Heidelberg, 2012.
- Ramani et al. 2010 Ramani, K.; Ramanujan, D.; Bernstein, W. Z.; Zhao, F.; Sutherland, J.; Handwerker, C.; Choi, J. K.; Kim, H.; Thurston, D.: Integrated Sustainable Life Cycle Design: A Review. Journal Mechanical Design, 132:1-15, 2010.
- Redlich 2011 Redlich, T.: Wertschöpfung in der Bottom-up-Ökonomie. Wulfsberg, J. P. (Hg.). Springer, Berlin Heidelberg, 2011.
- Ritsert 2000 Ritsert, J.: Gesellschaft: Ein unergründlicher Grundbegriff der Soziologie. Campus Verlag, Frankfurt/Main, 2000.
- Robèrt et al. 2002 Robèrt, K.-H.; Schmidt-Bleek, B.; Aloisi de Larderel, J.; Basile, G.; Jansen, J. L.; Kuehr, R.; Price Thomas, P.; Suzuki, M.; Hawken, P.; Wackernagel, M.: Strategic sustainable development – selection, design and synergies of applied tools. Journal of Cleaner Production, 10(3):197-214, 2002.
- Rodriquez et al. 2002 Rodriquez, S.I.; Roman, M.S.; Sturhahn, S.H.; Terry, E.H.: Sustainability Assessment and Reporting for the University of Michigan's Ann Arbor Campus. University Master's Project. University of Michigan, Ann Arbor, 2002.
- Rohweder et al. 2011 Rohweder, J. P.; Kasten, G.; Malzahn, D.; Piro, A.; Schmid, J.: Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe. In: Hildebrand, K., Gebauer, M., Hinrichs, H., Mielke, M. (Hrsg.). Daten und Informationsqualität: Auf dem Weg zur Informations Excellence. 2. Auflage, Vieweg Teubner, Wiesbaden, 2011.

- Ropohl 2009 Ropohl, G.: Allgemeine Technologie – Eine Systemtheorie der Technik. 3. Auflage, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2009.
- Ruhland et al. 2004 Ruhland, K.; Finkbeiner, M.; Griesser, S.; Hoffmann, R.; Binder, M.; Schön, H.; Volz, T.: Process and tools to support Design for Environment at Mercedes Car Group. Fourth International Automobile Recycling Congress, 10.03.2014 bis 12.03.2014, Genf 2014.
- Santini et al. 2010 Santini, A.; Herrmann, C.; Passarini, F.; Vassura, I.; Luger, T.; Morselli, L.: Assessment of Ecodesign potential in reaching new recycling targets. In: Resources, Conservation and Recycling, 54(12):1128–1134, 2010.
- Schäfers 2008 Schäfers, B.: Soziales Handeln und seine Grundlagen: Normen, Werte, Sinn. In: Korte H.; Schäfers, B. (Hrsg.): Einführung in Hauptbegriffe der Soziologie. 7. Auflage, VS Verlag, Wiesbaden, 2008.
- Schaltegger et al. 2013 Schaltegger, S.; Beckmann, M.; Hansen, E.G.: Transdisciplinarity in corporate sustainability: mapping the field. Business Strategy and the Environment, 22(4):219-229, 2013.
- Schaltegger und Hansen 2013 Schaltegger, S.; Hansen, E.: Unternehmerische Nachhaltigkeitsinnovationen durch nachhaltiges Unternehmertum. In: Altenburger, R. (Hg.): CSR und Innovationsmanagement, 19–30, Springer, Heidelberg, 2013.
- Schmidt 2005 Schmidt, M.: Grenzen des Wachstums und Nachhaltigkeit – Die Meilensteine einer fortwährenden Debatte. In: Schriftenreihe des Fachbereichs Wirtschaft der Hochschule Bremen, Band 69, Bremen, 2005.
- Schreiber et al. 2000 Schreiber, G.; Akkermans, H.; Anjewierden, A.; de Hoog, R.; Shadbolt, N.; Van de Velde, W.; Wielinga, B.: Knowledge Engineering and Management: The CommonKADS Methodology. Mit Press Ltd, Cambridge London, 2000.
- Schütz 2013 Schütz, T.: Hucho - Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort. 6. Auflage, Springer, Berlin 2013.
- Schwarzer 2014 Schwarzer, C. M.: Roadmap 95 Gramm. In: Automobilwoche edition – Technologie von Volkswagen. Ausgabe September 2014, B58301.Crain Communications, 2014.
- Seliger 2012 Seliger, G.: Sustainable Manufacturing for Global Value Creation. In: Seliger, G. (Hrsg.): Sustainable Manufacturing – Shaping Global Value Creation. Seiten 3-8. Springer, Berlin Heidelberg, 2012.

- Sendler 2013 Sendler, U.: Industrie 4.0 – Beherrschung der Industriellen Komplexität mit SysLM (Systems Lifecycle Management). In: Sendler, U. (Hrsg.): Industrie 4.0 – Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 2013.
- Serageldin 1995 Serageldin, I.: Promoting Sustainable Development: Toward a New Paradigm. In: Serageldin, I.; Steer, A. (Hrsg.): Valuing the Environment. Proceedings of the first Annual International Conference on Environmentally Sustainable Development, World Bank, Washington D.C., 1995.
- SHDB 2016 Social hotspots database (SHDB). Online verfügbar unter: <http://socialhotspot.org/>, Zugriff am 01.03.2016.
- Simon und
Sweatman 1997 Simon, M.; Sweatman, A.: Products of a sustainable future. International Sustainable Development Research, 1997.
- Smith 2010 Smith, L. C.: The World in 2050 - Four Forces Shaping Civilization's Northern Future. Dutton, New York, 2010.
- Spangenberg et al.
2010 Spangenberg, J. H.; Fuad-Luke, A.; Blincoe, K.: Design for Sustainability (DfS): the interface of sustainable production and consumption. Journal of Cleaner Production, 18(15):1485–1493, 2010.
- Spicer und Wang
1995 Spicer, A. J.; Wang, M. H.: A software tool for end-of-life-cycle consideration within a DSS approach to environmentally conscious design and manufacturing. In: Proceedings of the 17th International Conference on Computers and Industrial Engineering, 29(1–4):501–505, 1995.
- Spicer und Wang
1997 Spicer, A.; Wang, M. H.: Environmental Design Industrial Template (EDIT): a software tool for analysis of product retirement. Journal of Cleaner Production, 5(3):193–198, 1997.
- Spur und Krause
1997 Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik. Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig, 1997.
- Stark et al. 2002 Stark, R.; Lietzau, H.-P.; Klar, A.: Management turbulenter Informationsflüsse in der virtuellen Produktentstehung. In: VDI-Berichte Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung. Tagung zur CAT Engineering, VDI-Gesellschaft EKV, Stuttgart, 2002.
- Stark et al. 2015 Stark, R.; Kim, M.; Damerau, T.; Neumeyer, S.; Vorsatz, T.: Notwendige Voraussetzungen für die Realisierung von Industrie 4.0 - Ein Beitrag aus der Sicht der Industriellen Informationstechnik. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF), 3/2015, 134-141, 2015.

- Stark und Stöckert 2009 Stark, R.; Stöckert, H.: Interface Errors - An Issue in Complex Virtual Product Creation. In: Bergendahl, M. N.; Grimheden, M.; Leifer, L.; Skogstad P.; Lindemann, U. (Hrsg.): Proceedings of ICED'09, 465–476, Design Society, Glasgow, 2009.
- Stevel 2001 Stevel, A.: Environment and business - Eco-design for Electronic products. Delft University, 2001.
- Teichmann et al. 2012 Teichmann, G. A.; Trützscher, J.; Hahn, C.; Schäfer, P. K.; Hermann, A.; Höhne, K.: Elektromobilität – Normen bringen die Zukunft in Fahrt. In: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): Ableitung des mittel- bis langfristigen Normungs- und Standardisierungsbedarfs im Bereich Elektromobilität auf Basis der sozioökonomischen Entwicklung. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2012.
- Theret et al. 2011 Theret, J.-P.; Zwolinski, P.; Mathieux, F.: Integrating CAD, LM and LCA: A new Architecture and Integration Proposal. In: International Conference on Renewable Energy and Eco-Design in Electrical Engineering, 1-6, Lille, 2011.
- Theuer et al. 2010 Theuer, H.; Klaukien, M.; Lass, S.: Marktrecherche Product Lifecycle Management Systeme. Productivity Management (2):33-36, 2010.
- Tingström und Karlsson 2006 Tingström, J.; Karlsson, R.: The relationship between environmental analyses and the dialogue process in product development. Journal of Cleaner Production 14(15-16):1409–1419, 2006.
- Todd und Curran 1999 Todd, J. A.; Curran, M. A.: Streamlined Life-Cycle Assessment: A Final Report From the SETAC North America Streamlined LCAWorkgroup. Society of Environmental Toxicology and Chemistry _SETAC_ and SETAC Foundation for Environmental Education, 1999.
- Trumpf 2013 Trumpf GmbH + Co. KG: Schwerpunkt nachhaltiges Wirtschaften. Online verfügbar unter <http://www.de.trumpf.com/index.php?id=23428>, Zugriff am 15.01.2013.
- Ueda et al. 2009 Ueda et al.: Value Creation and Decision-Making in Sustainable Society. Annals of the CIRP, 58/2:2009, 2009.
- Ulrich und Eppinger 2008 Ulrich, K. T.; Eppinger, S. D.: Product Design and Development. McGraw-Hill International Edition, 4. Auflage, New York, 2008.
- UN 2010 United Nations (UN): Keeping the promise: a forward-looking review to promote an agreed action agenda to achieve the Millennium Development Goals by 2015. General Assembly A/64/665, 12 February 2010.

- UN 2013 United Nations (UN): Online verfügbar unter: http://www.unglobalcompact.org/Languages/german/die_zehn_prinzipien.html, Zugriff am 25.08.2013.
- UN 2015 United Nations (UN): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations Resolution A/RES/70/1 adopted by the General Assembly on 25 September 2015, New York, 2015.
- UNEP 2007 United Nations Environment Programme (UNEP): Life Cycle Management – A Business Guide to Sustainability. UNEP, 2007.
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative 2009 UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (Hg.): 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. Geneva, 2009.
- University of Michigan 2013 University of Michigan: LiDS Wheel Analyses. Online verfügbar unter: <http://www.engin.umich.edu/labs/EAST/me589/ecodatabasefinal/intropage.html>, Zugriff am 04.06.2013.
- van Weenen 1995 van Weenen, H.: Towards sustainable product development. *Journal of Cleaner Production*, 3,(1–2):95-100, 1995.
- van Weenen 1997 van Weenen, H.: Design for sustainable development – Practical Examples of SMEs. European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, 1997.
- Vargas Hernandez et al. 2012 Vargas Hernandez, N.; Okudan Kremer, G.; Schmidt, L. C.; Acosta Herrera, P. R.: Development of an expert System to aid engineers in the selection of design for environment methods and tools. *Expert Systems with Applications*, 39(10):9543-9553, 2012.
- Vermeir und Verbeke 2006 Vermeir, I.; Verbeke, W.: Sustainable food consumption: Exploring the consumer –attitude-behavioral intention gap. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 19(2):169-194, 2006.
- Vogel 2006 Vogel, H.: Die virtuelle Fabrik – Teil 4: Der Produktlebenszyklus – Simulationen zwischen Konstruktion und Fertigung. *c't* (9), 89-101. 2006.
- Wartzack 2001 Wartzack, S.: Predictive Engineering: Assistenzsystem zur multikriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2001.
- WCED 1987 World Commission on Environment and Development: Our Common Future. United Nations General Assembly, Nairobi, 1987.

- Welsh 2012 Welsh, J.: Chevy Volt: Why Isn't it Selling Well? In: The Wall Street Journal Blog. Online verfügbar unter <http://blogs.wsj.com/drivers-seat/2012/03/03/chevy-volt-why-isnt-it-selling-well/>, Zugriff am 26.03.2013.
- Wilhelm 2007 Wilhelm, R.: Prozessorganisation. 2. Auflage, Oldenbourg (Managementwissen für Studium und Praxis), München, 2007.
- Wimmer et al.
2004 Wimmer, W.; Züst, R.; Kun-Mo, L.: Ecodesign Implementation. A Systematic Guidance on Integrating Environmental Considerations into Product Development. Springer, Alliance for Global Sustainability Bookseries, Vol. 6, 2004.
- Wimmer und Züst
2003 Wimmer, W.; Züst, R.: ECODESIGN pilot. Product-investigation-, learning- and optimization-tool for sustainable product development. Kluwer Academic, Dordrecht London, 2003.
- Yu et al. 1999 Yu, S. Y.; Zhang, H.-C.; Ertas, A.: Environmental Conscious Design: An Introduction to EDST. Journal of Integrated Design and Process Science, 3(4):27–38, 1999.

Anhang

Anhang I. Millennium Development Goals

Die acht Millennium Development Goals der UN lauten:

1. Eradicate extreme poverty and hunger
2. Achieve universal primary education
3. Promote gender equality and empower women
4. Reduce child mortality
5. Improve maternal health
6. Combat HIV/AIDS, malaria and other diseases
7. Ensure environmental sustainability

Anhang II. Sustainable Development Goals

Goal 1. End poverty in all its forms everywhere

Goal 2. End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture

Goal 3. Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages

Goal 4. Ensure inclusive and equitable quality education and promote lifelong learning opportunities for all

Goal 5. Achieve gender equality and empower all women and girls

Goal 6. Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all

Goal 7. Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all

Goal 8. Promote sustained, inclusive and sustainable economic growth, full and productive employment and decent work for all

Goal 9. Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation

Goal 10. Reduce inequality within and among countries

Goal 11. Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable

Goal 12. Ensure sustainable consumption and production patterns

Goal 13. Take urgent action to combat climate change and its impacts*

Goal 14. Conserve and sustainably use the oceans, seas and marine resources for sustainable development

Goal 15. Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss

Goal 16. Promote peaceful and inclusive societies for sustainable development, provide access to justice for all and build effective, accountable and inclusive institutions at all levels

Goal 17. Strengthen the means of implementation and revitalize the Global Partnership for Sustainable Development

Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen (UN 2015, S. 18)

Anhang III. Pre-Selection: UN Global Compact

Suchkriterien vom 15.05.2014:

- Ownership: Any type of Ownership
- Communication on Progress Status: Active

Section: Aerospace and Defence

Unternehmen	Ownership	Land	Beitritt
Aciturri Aeronautica	Private Company	Spain	15.05.2013
Aertec	Private Company	France	11.05.2006
Air Europa Lineas Aere...	Private Company	Spain	05.02.2013
AIRBUS GROUP	Publicly Listed	Netherlands	17.06.2003
All Nippon Airways Co....	Company	Japan	30.05.2008
ASUR - Grupo Aeropuert...	Public Company	Mexico	06.02.2006
AVTECH Sweden AB (publ)	Public Company	Sweden	09.06.2008
C AND G AIR CC	Private Company	South Africa	14.01.2010
CEPM Industrie	Private Company	France	06.01.2014
Compania Operadora de ...	Private Company	Spain	29.08.2013
Dassault Aviation	Publicly Listed	France	19.05.2003
Daudsons Armoury (Pvt)...	Private Company	Pakistan	05.04.2006
EMBRAER S.A.	Private Company	Brazil	16.06.2008
ERYSGROUP	Private Company	France	08.11.2012
FAI rent-a-jet AG	Private Company	Germany	06.07.2005
Flughafen Stuttgart GmbH	Public Company	Germany	08.02.2011
Fraport AG	Private Company	Germany	17.07.2007
GM Helicopters	Private Company	Latvia	17.12.2009
GoAGT Ltd.	Private Company	Seychelles	17.01.2013
Hellenic Aerospace Ind...	State-owned	Greece	18.06.2008
HTS maskinteknikk as	Private Company	Norway	16.12.2013
Incheon International ...	Private Company	Korea, Repub...	24.03.2007
INFRAERO	Private Company	Brazil	12.03.2004
International Trading ...	Private Company	Jordan	07.03.2012
ISDEFE- Ingenieria de ...	State-owned	Spain	23.09.2009
Karcher Futuretech GmbH	Subsidiary	Germany	14.01.2014
Korea Airports Corpora...	Public Company	Korea, Repub...	31.10.2007
Korean Air	Private Company	Korea, Repub...	16.07.2007
MTU Aero Engines	Public Company	Germany	03.05.2011
Nammo AS	State-owned	Norway	16.01.2012
Osprea Logistics SA (P...	Private Company	South Africa	01.05.2013
Patria Oyj	Private Company	Finland	29.10.2013
Saab AB (publ)	Public Company	Sweden	15.06.2011
Safran	Private Company	France	08.01.2014
Segtec	Private Company	Mexico	31.01.2011
Swedish Space Corporation	State-owned	Sweden	11.10.2013
Swissport Internationa...	Private Company	Switzerland	13.10.2011

TAM Linhas Aereas S.A.	Private Company	Brazil	15.05.2008
Thales	Publicly Listed	France	03.06.2003
UUDS	Private Company	France	19.02.2013
VSC Security Solutions	Private Company	Iraq	30.06.2013
West Atlantic AB (publ)	Private Company	Sweden	03.10.2011

Section: Automobiles and Parts

Unternehmen	Ownership	Land	Beitritt
A. Raymond	Private Company	France	21.07.2003
AB Volvo Group	Public Company	Sweden	24.12.2001
AD Plastik	Private Company	Croatia	05.03.2013
Adampol JSC	Private Company	Poland	30.04.2010
Agility Fuel Systems	Private Company	United State...	22.05.2013
Agriauto Industries Li...	Private Company	Pakistan	04.04.2006
Altia Group	Private Company	France	17.12.2010
Angao	Private Company	China	18.01.2008
Anwar Akkad Sons Company	Private Company	Syrian Arab ...	01.06.2010
AUDI AG	Public Company	Germany	23.02.2012
Autohaus Atlant-M	Private Company	Belarus	20.11.2006
Bavarian Auto Group	Private Company	Egypt	18.05.2010
Beijing Jichi Motor Di...	Private Company	China	21.01.2009
Belintertrans Ltd	Private Company	Belarus	01.08.2007
BENOIT JOLIVET	Private Company	France	20.12.2013
BMW AG	Public Company	Germany	25.07.2001
BMW Brilliance Automot...	Private Company	China	14.01.2014
Bosch Group	Private Company	Germany	09.11.2004
Brisa Bridgestone Saba...	Public Company	Turkey	17.07.2013
Centro de Distribucion...	Private Company	Mexico	08.11.2011
Comercial Distribuidor...	Private Company	Mexico	23.10.2012
Conrico International ...	Private Company	United Kingdom	21.03.2011
Continental AG	Public Company	Germany	16.10.2012
CORAM Europe S.r.l.	Private Company	Italy	12.11.2013
Daimler AG	Public Company	Germany	26.07.2000
DAL Motor Company Limited	Private Company	Sudan	20.05.2009
Diesel und Motor Enginee...	Public Company	Sri Lanka	27.03.2012
Dogus Otomotiv Servis ...	Public Company	Turkey	16.03.2010
Empresa Mixta de Trans...	State-owned	Argentina	12.12.2013
Faurecia	Public Company	France	16.03.2004
Fiat Argentina S.A.	Private Company	Argentina	12.10.2004
Ficosa International, ...	Private Company	Spain	24.09.2002
Fogmaker International AB	Private Company	Sweden	19.01.2012
Ford Argentina SCA	Private Company	Argentina	26.07.2004
Ford Motor Company	Public Company	United State...	01.05.2008
FPK Lightweight Techno...	Private Company	Spain	19.07.2013
Frauenthal Automotive ...	Private Company	Poland	14.01.2010

Fritz Winter Eisengies...	Private Company	Germany	06.11.2007
Ghabbour Auto SAE	Public Company	Egypt	30.11.2010
Groupe Gruau	Private Company	France	03.06.2008
Groupe Mecanique Decou...	Private Company	France	18.06.2003
Grupo Antolin	Private Company	Spain	27.01.2004
Grupo Gestamp	Private Company	Spain	29.09.2008
Grupo LCH Refaccionarias	Private Company	Mexico	29.05.2013
Grupo Purdy Motor	Private Company	Costa Rica	09.02.2011
Hankook Tire	Private Company	Korea, Repub...	28.12.2012
Hinopak Motors Limited	Public Company	Pakistan	22.06.2006
Hnos. Sanchez Lafuente...	Private Company	Spain	26.01.2012
Huf Portuguesa, Lda	Private Company	Portugal	03.07.2013
Hyundai Motor Company	Private Company	Korea, Repub...	02.07.2008
Imortas Oto Yedek Parc...	Private Company	Turkey	05.02.2014
Indus Motor Company	Public Company	Pakistan	21.02.2006
International Armored ...	Private Company	United Arab ...	30.06.2009
IRIZAR	Private Company	Spain	14.06.2013
ITVASA	Public Company	Spain	30.04.2007
JABA Group AB	Private Company	Sweden	28.03.2012
JKL Kunststoff Lackier...	Private Company	Germany	26.02.2013
Johnson Controls Inc.	Public Company	United State...	31.03.2004
Kabel-Technik-Polska S...	Private Company	Poland	03.02.2010
Katmerciler Aracustu E...	Private Company	Turkey	12.03.2012
Kenta Enterprise Co., ...	Private Company	China	02.01.2013
KIA Motors Corporation	Private Company	Korea, Repub...	02.07.2008
Kirchhoff Automotive GmbH	Private Company	Germany	21.10.2010
KJAER und KJAER A/S	Private Company	Denmark	13.05.2011
KJAER GROUP A/S	Private Company	Denmark	17.10.2003
Knorr-Bremse Group	Private Company	Germany	01.10.2010
LEONI AG	Public Company	Germany	29.08.2011
Lisi Automotive	Private Company	France	19.11.2007
M. Busch GmbH und Co. KG	Private Company	Germany	24.09.2013
Malmo Slapvagnscenter AB	Private Company	Sweden	05.04.2010
MAN SE	Company	Germany	06.12.2010
Martur Sunger ve Koltu...	Private Company	Turkey	11.10.2012
Mekonomen AB	Public Company	Sweden	30.04.2013
MESA MAKINA DOKUM A.S.	Private Company	Turkey	03.06.2010
MEVIS s.p.a.	Private Company	Italy	27.11.2008
Michelin	Public Company	France	23.02.2010
MOBICA for Advanced In...	Private Company	Egypt	15.10.2012
MOBIS Co., Ltd.	Public Company	Korea, Repub...	02.07.2008
MOTORCARE LDA - MOZAMB...	Private Company	Mozambique	15.02.2006
MOTORCARE LTD - Sierra...	Private Company	Sierra Leone	13.05.2011
MOTORCARE LTD - UGANDA	Private Company	Uganda	18.11.2005
Motorcraft Kenya Ltd	Private Company	Kenya	14.03.2014
Nief Plastic	Private Company	France	20.05.2004
Nissan Motor Co. Ltd.	Public Company	Japan	01.03.2004

Octagon International ...	Private Company	Myanmar	02.08.2013
Otokoc Otomotiv A.S	Private Company	Turkey	11.05.2010
Pirelli und C. S.p.A.	Private Company	Italy	07.10.2004
Plastic Omnium	Public Company	France	18.06.2003
Prevent Group BH	Private Company	Bosnia-Herze...	05.01.2011
Productos Nacionales B...	Private Company	Mexico	18.04.2013
PSA Peugeot Citroen	Public Company	France	19.03.2003
Rahimafrooz Batteries ...	Private Company	Bangladesh	23.08.2006
Rastgar Engineering Co...	Private Company	Pakistan	20.02.2006
Renault Argentina S.A.	Private Company	Argentina	26.10.2005
Renault SAS	Public Company	France	23.08.2001
Renault Trucks	Public Company	France	09.09.2004
Ricardo Perez S.A.	Private Company	Panama	30.08.2001
Robin Industries, Inc.	Private Company	United State...	04.09.2012
Rollmech Automotive	Private Company	Turkey	04.01.2012
ROMRADIATOARE S.A.	Private Company	Romania	17.06.2010
RPK Group	Private Company	Spain	02.08.2012
SANLUIS Rassini	Public Company	Mexico	07.08.2013
Shanghai Grand Model C...	Private Company	China	07.03.2011
Shanghai Vico Precisio...	Private Company	China	12.03.2008
South East Electronic ...	Private Company	India	17.10.2007
Stone City Products, Inc.	Private Company	United State...	15.04.2009
Suzhou Yeswin Manufact...	Private Company	China	05.02.2008
Takayama Tire Shoukai ...	Private Company	Japan	30.09.2011
Talleres Termi, S.A.	Private Company	Spain	06.06.2013
Taranto San Juan S.A.	Private Company	Argentina	16.08.2004
Tecmaplast S.A.S.	Private Company	France	03.02.2011
The Armored Group	Private Company	United State...	30.05.2013
Thermodyne Vial SRL	Private Company	Argentina	07.08.2013
Torcomp Usinagem e Com...	Private Company	Brazil	01.02.2010
Toyota Gibraltar Stock...	Private Company	United Kingdom	06.03.2013
Treves	Private Company	France	03.07.2003
UFI GROUP	Private Company	Tunisia	29.12.2009
Ultimate Armour Works FZC	Private Company	United Arab ...	11.07.2013
Valeo	Public Company	France	04.03.2004
Verificaciones Industr...	Private Company	Spain	06.10.2009
Volkswagen AG	Public Company	Germany	27.08.2002
ZF Friedrichshafen AG	Public Company	Germany	25.04.2012

Section: Technology and Hardware

Unternehmen	Ownership	Land	Beitritt
Aamra Technologies Lim...	Public Company	Bangladesh	21.02.2014
Access Spectrum Compan...	Private Company	Myanmar	09.12.2013
ACMI	Private Company	France	25.07.2013
Acome	Public Company	France	21.10.2005

Altran Innovacion, S.L...	Subsidiary	Spain	08.10.2008
Anritsu Corporation	Public Company	Japan	06.03.2006
Antmak Office Technolo...	Private Company	Kenya	20.11.2013
Arelance, S.L.	Private Company	Spain	16.02.2011
Areva	Public Company	France	20.03.2003
ARM Holdings plc	Public Company	United Kingdom	04.08.2010
AT4 wireless S.A.	Private Company	Spain	16.02.2011
Atea	Private Company	Norway	20.05.2010
Avansis Integracion	Private Company	Spain	11.10.2011
Axis Communications AB	Public Company	Sweden	09.01.2007
BALAS	Private Company	France	18.05.2004
BayWa r.e Solar Systems	Private Company	United Kingdom	16.05.2012
Cables de Comunicacion...	Private Company	Spain	16.09.2010
Canon Europe Ltd	Subsidiary	United Kingdom	22.01.2014
CDP Digital, SA	Private Company	Panama	30.05.2012
Cheval Group	Private Company	Thailand	12.03.2009
Cisco Systems	Public Company	United State...	06.09.2001
Citizen Holdings Co., ...	Public Company	Japan	04.04.2005
Cobser Consulting, S.L.	Private Company	Spain	15.05.2013
Comercializadora Integ...	Private Company	Chile	12.12.2013
Computer Bytes Ltd	Private Company	Rwanda	26.06.2013
Corporation Solar Alli...	Private Company	Ukraine	28.06.2010
Danfoss Group	Private Company	Denmark	21.10.2002
Danoffice ApS	Private Company	Denmark	06.06.2007
Data Consult SAL	Private Company	Lebanon	07.05.2012
Decide Soluciones S.L.	Private Company	Spain	30.05.2013
Desarrollos Informatic...	Private Company	Spain	31.05.2012
DPA Services, S.A. de ...	Private Company	Mexico	05.07.2013
DYADEM	Private Company	France	14.10.2013
E.E.P.D. GmbH	Private Company	Germany	18.08.2011
Electronsystem MD	Private Company	Italy	20.11.2007
Embraco	Private Company	Brazil	08.04.2004
Environnement SA	Private Company	France	03.06.2003
EPCOS AG	Subsidiary	Germany	03.07.2003
EPS (Engineering and P...	Private Company	United State...	26.05.2006
Eurotech	Public Company	Italy	03.11.2009
Everspin	Private Company	United State...	10.06.2013
Eximo Consultora en Si...	Private Company	Argentina	27.05.2009
folan	Private Company	France	20.09.2012
Foss	Private Company	Denmark	07.03.2012
Fuji Xerox Co., Ltd.	Private Company	Japan	31.08.2002
Gesab, S.A.	Private Company	Spain	08.05.2014
Giasa Brasil Industria...	Private Company	Brazil	27.09.2011
Giesecke und Devrient GmbH	Private Company	Germany	27.09.2010
Global Incubator	Private Company	Spain	29.08.2013
GP Manufacturing Singa...	Private Company	Singapore	07.11.2007
Group of Companies Fox...	Private Company	Ukraine	14.12.2006

HAWE Hydraulik SE	Private Company	Germany	31.10.2011
Hewlett-Packard Company	Public Company	United State...	29.08.2002
Hitachi, Ltd.	Public Company	Japan	27.02.2009
Infineon Technologies AG	Public Company	Germany	11.11.2004
Infodip SAS	Private Company	France	07.04.2014
Ingeteam	Private Company	Spain	16.05.2006
InsulFab Plastics, Inc.	Private Company	United State...	19.12.2011
Intel Corporation	Public Company	United State...	12.06.2009
INTRALOT	Private Company	Greece	18.06.2008
Invap S.E.	State-owned	Argentina	10.08.2004
Invensys plc	Public Company	United Kingdom	22.08.2001
Kapsch TrafficCom AG	Public Company	Austria	29.12.2009
KIRD	Private Company	Korea, Repub...	16.08.2013
Koncar Electrical Indu...	Private Company	Croatia	30.04.2007
Koninklijke Philips El...	Public Company	Netherlands	06.03.2007
LAFI	Subsidiary	France	17.01.2012
Lenord, Bauer und Co. ...	Private Company	Germany	02.03.2011
Lenovo	Public Company	China	05.01.2009
Lexmark International ...	Public Company	United State...	28.05.2008
LG Electronics, Inc.	Private Company	Korea, Repub...	29.12.2009
Lodam electronics a/s	Private Company	Denmark	21.03.2012
Macro Wiring Technolog...	Private Company	Philippines	19.10.2011
Magnetec GmbH	Private Company	Germany	05.10.2007
Management und Global Te...	Private Company	Spain	16.10.2013
Mellon Group of Companies	Private Company	Greece	17.06.2011
MEN Mikro Elektronik GmbH	Private Company	Germany	25.08.2005
Metso Corporation	Public Company	Finland	16.10.2006
MF Trasformatori	Private Company	Italy	17.01.2014
Microchip Technology I...	Public Company	United State...	25.04.2013
Mipro	Private Company	Finland	11.03.2014
Mitsubishi Heavy Indus...	Public Company	Japan	27.08.2004
NEC Corporation	Public Company	Japan	16.05.2005
NEUROTECH	Private Company	Senegal	22.05.2012
Nikon Corporation	Private Company	Japan	16.07.2007
Nokia Corporation	Public Company	Finland	25.05.2001
Noor Al Saraj Co. for ...	Private Company	Iraq	16.12.2011
Numthip Associates	Private Company	Thailand	25.10.2013
Nunsys S.L.	Private Company	Spain	13.02.2014
Oberthur Technologies	Private Company	France	29.10.2006
Olympus Corporation	Public Company	Japan	20.10.2004
Orbital Engenharia Ltda	Private Company	Brazil	16.08.2013
PCH International	Private Company	Ireland	12.04.2012
Phoenix Contact GmbH und...	Private Company	Germany	05.07.2005
Planson International	Private Company	United State...	01.11.2007
Polypore	Private Company	France	23.05.2011
Portillo Telecomunicac...	Private Company	Spain	02.10.2013
Power Electronics Espa...	Private Company	Spain	03.09.2010

Presentations Data AS	Private Company	Norway	15.01.2009
Pristine Systems Ltd	Private Company	Kenya	28.08.2013
Proteccion y Alarmas P...	Private Company	Mexico	24.09.2012
R.I.S.K. Company	Private Company	Azerbaijan	19.02.2009
Resguardo Preventivo O...	Private Company	Mexico	28.08.2012
RICOH Company Ltd	Public Company	Japan	02.05.2002
Ricoh Europe	Subsidiary	United Kingdom	03.12.2008
SundF Security and Fire ...	Private Company	Egypt	26.01.2014
S.A. Kiloutou	Private Company	France	26.12.2012
Seabery Soluciones, S.L.	Private Company	Spain	10.07.2012
Seagate Technology	Public Company	United State...	06.04.2004
Seiko Epson Corporation	Public Company	Japan	16.07.2004
SEMIC	Private Company	Spain	05.04.2013
Semikron International...	Private Company	Germany	04.05.2012
Sharp Corporation	Public Company	Japan	11.06.2009
Shenzhen Emperor Techn...	Private Company	China	07.11.2013
Siemens AG	Public Company	Germany	26.11.2003
SK hynix Inc.	Private Company	Korea, Repub...	29.09.2009
SLINTEC (PVT) Ltd	Private Company	Sri Lanka	21.04.2009
Stage Electrics	Private Company	United Kingdom	18.06.2009
Stanley Security Solut...	Private Company	Spain	11.12.2008
SVI Public Company	Public Company	Thailand	27.01.2005
Tamron Co., Ltd.	Private Company	Japan	13.08.2007
Tecnologia Sistemas y ...	Private Company	Spain	23.10.2013
Telemachine Telematica...	Private Company	Brazil	02.08.2012
Telesoft Ltd.	Private Company	Russian Fede...	13.06.2013
TIL Technologies	Private Company	France	15.03.2004
Tinamica	Private Company	Spain	25.01.2013
Tokyo Electron Limited	Public Company	Japan	15.07.2013
Tomra Systems ASA	Public Company	Norway	29.12.2009
Toshiba Corporation	Public Company	Japan	12.01.2004
Transmode Systems AB	Public Company	Sweden	08.06.2011
TRC Informatica, S.L.	Private Company	Spain	30.05.2013
Triacta Power Technolo...	Private Company	Canada	14.07.2008
Tridonic NZ Limited	Private Company	New Zealand	19.12.2007
Tropical Cable and Con...	Private Company	Ghana	14.11.2006
u-blox AG	Public Company	Switzerland	12.01.2012
UMC Electronics Co., Ltd	Company	Japan	14.07.2010
Unitec Blue S.A.	Private Company	Argentina	24.04.2013
Vaisala Oyj	Public Company	Finland	16.10.2008
Valmet Corporation	Private Company	Finland	13.01.2014
WAGO Kontakttechnik Gm...	Private Company	Germany	23.12.2011
Wenzel Elektronik GmbH	Private Company	Germany	19.09.2007
Wieland Electric GmbH	Private Company	Germany	29.05.2008
Ydeo	Private Company	France	27.07.2011
Yokogawa Electric Corp...	Public Company	Japan	05.01.2009
Zhuzhou CSR Times Elec...	Public Company	China	18.11.2009

ZIV Aplicaciones y Tec...	Private Company	Spain	06.06.2006
----------------------------------	-----------------	-------	------------

Section: General Industrials

Unternehmen	Ownership	Land	Beitritt
3M	Public Company	United State...	21.02.2014
A. Hatzopoulos S.A.	Private Company	Greece	04.08.2010
A.S. Pindel Corp.	Private Company	United State...	04.12.2007
Abalioglu Holding A.S.	Private Company	Turkey	12.12.2007
ABCDisplays S.A.	Private Company	Colombia	07.03.2013
Abengoa	Public Company	Spain	20.09.2002
Abertis Infraestructuras	Public Company	Spain	26.01.2005
ACOVISA INDUSTRIA E CO...	Private Company	Brazil	05.03.2010
Action Service Corpora...	Private Company	United State...	06.01.2014
Addit Sp. z o.o.	Private Company	Poland	25.01.2011
Adpack Limited	Private Company	Kenya	07.11.2013
Advanced Battery Techn...	Private Company	United State...	04.01.2012
Advanced Labelworx, Inc.	Private Company	United State...	10.01.2008
aeK tec GmbH	Private Company	Germany	16.03.2012
Aid Green Co., Ltd.	Private Company	Korea, Repub...	08.06.2011
Akfen Holding Co. Inc.	Private Company	Turkey	02.07.2002
Akkok Sanayi ve Gelist...	Private Company	Turkey	13.12.2007
Aktiebolaget SKF	Public Company	Sweden	28.09.2006
Akyurek Kardesler Tari...	Private Company	Turkey	01.04.2014
Algon EMM SL	Private Company	Spain	24.07.2008
ALIZON INDUSTRIE	Private Company	France	03.02.2009
Allmer	Private Company	France	18.07.2013
Alstom	Private Company	France	18.03.2008
Altenburg Industria Te...	Private Company	Brazil	07.08.2013
Amac Impresos	Private Company	Mexico	02.03.2011
Amsterdam RAI	Private Company	Netherlands	23.07.2008
Anas S.p.A.	Private Company	Italy	20.12.2010
Anglo American plc	Public Company	United Kingdom	27.07.2004
Anhanguera Educacional...	Private Company	Brazil	03.06.2010
APF Entreprises	Private Company	France	30.12.2011
API Restauration	Private Company	France	05.02.2008
Arauco do Brasil	Private Company	Brazil	23.02.2012
ARC International	Private Company	France	14.05.2003
Aros Quality Group AB	Public Company	Sweden	14.10.2011
Asahi Kasei Corporation	Public Company	Japan	21.06.2006
Aslanli Uluslar Arasi ...	Private Company	Turkey	19.03.2014
Atlas Metal Products M...	Private Company	Philippines	21.04.2014
Atlas-Atlantic Integra...	Private Company	Nigeria	04.03.2014
AuOne Electronic Manuf...	Private Company	China	29.11.2010
Axiam	Private Company	New Zealand	20.09.2011
Axiline International ...	Private Company	China	26.12.2012
Aztec Plumbing, S.A. d...	Private Company	Mexico	01.11.2012
Balmer Lawrie und Co. Ltd.	Public Company	India	29.05.2002

Barloworld	Public Company	South Africa	08.12.2004
Baxx Promotion	Private Company	Denmark	26.03.2013
Bayer AG	Company	Germany	26.07.2000
Bazz Houston	Private Company	United State...	17.10.2008
BDP International, Inc	Private Company	United State...	28.01.2010
Befesa Medio Ambiente,...	Private Company	Spain	17.02.2006
Bene AG	Private Company	Austria	30.08.2010
Bergen Plastics AS	Private Company	Norway	01.10.2010
Bergen Skipsinnredning AS	Private Company	Norway	20.05.2014
Best Industrial Compan...	Private Company	Myanmar	26.09.2012
Betrancourt Group	Private Company	France	18.07.2013
Biblomodel, SA de CV	Private Company	Mexico	30.10.2008
BIC Argentina S.A.	Private Company	Argentina	28.06.2012
Biogrow Lanka (Pvt) Ltd	Private Company	Sri Lanka	03.09.2013
Boccard S.A.	Private Company	France	19.03.2013
Bombardier Inc	Public Company	Canada	17.03.2007
Borch Textile Group A/S	Private Company	Denmark	18.08.2009
Bouygues	Public Company	France	08.12.2006
Bowden Printing Pty Ltd	Private Company	Australia	21.07.2009
Bufab	Private Company	Sweden	04.10.2011
Burnstein von Seelen P...	Private Company	United State...	23.02.2011
Cables Industriels de ...	Private Company	France	14.10.2013
Cadena	Private Company	Colombia	23.08.2013
Cajas de Carton Sultan...	Private Company	Mexico	12.01.2012
Caldereria y Mecanizad...	Private Company	Spain	05.04.2013
Camfil	Private Company	Sweden	03.02.2009
Cane-line A/S	Private Company	Denmark	18.11.2013
Cangzhou Hui Bang Tran...	Private Company	China	20.04.2011
Cargotec Corporation	Private Company	Finland	27.11.2007
CART - Concessionaria ...	Private Company	Brazil	07.10.2010
Carvajal Internacional SA	Private Company	Colombia	24.05.2010
Cassab Ahun SRL	Private Company	Argentina	11.01.2008
Cavagna Group S.p.A.	Private Company	Italy	26.02.2014
CBPAK Tecnologia S/A	Private Company	Brazil	23.10.2013
Ceisa Packaging	Private Company	France	09.09.2013
Cellutec	Private Company	France	07.12.2011
Cesva Instruments S.L.	Private Company	Spain	09.06.2008
CEWE Stiftung und Co.KGaA	Public Company	Germany	23.09.2010
CFI Technologies	Private Company	France	25.10.2012
CGR	Private Company	France	29.11.2010
Chene Vert	Private Company	France	30.06.2009
CIFEC	Private Company	France	22.07.2010
CIPI ACTIA- Compagnie ...	Private Company	Tunisia	28.07.2006
CLEN	Private Company	France	21.10.2013
Clintoy International ...	Private Company	Nigeria	01.06.2010
Clip SAS	Private Company	France	27.07.2011
Cloitre Imprimeurs	Private Company	France	20.05.2011

COATO, Sociedad Cooper...	Private Company	Spain	10.01.2007
Coldec Holding b.v.	Private Company	Netherlands	21.02.2012
Comercial Gummi S.A.	Private Company	Spain	19.05.2014
Comptoir General de Ro...	Private Company	France	17.07.2012
Concessionaria Litoral...	Private Company	Brazil	19.06.2007
Confection Ras Jebel	Private Company	Tunisia	13.01.2014
Corporacion Euroameric...	Private Company	Spain	20.07.2011
Corporacion Geo S.A.B....	Public Company	Mexico	26.01.2006
Corporativo Agroindust...	Private Company	Mexico	26.11.2012
Criterion Technology, ...	Private Company	United State...	29.02.2012
CWS-boco International...	Private Company	Germany	18.07.2013
Daifuku Co., Ltd.	Public Company	Japan	05.05.2014
Dan Eli del Caribe S.A...	Private Company	Mexico	21.11.2013
Daorje, S.L.U.	Private Company	Spain	25.07.2011
Dätwyler Holding Inc.	Public Company	Switzerland	09.11.2009
DBL Group	Private Company	Bangladesh	15.11.2013
DECAYEUX	Private Company	France	13.07.2009
Dedienne Multiplasturg...	Private Company	France	30.09.2010
Demax Plc	Private Company	Bulgaria	04.02.2003
Department of Sustaina...	Private Company	Iran, Islami...	11.12.2013
Desarrollo Agroindustr...	Private Company	Mexico	20.01.2012
Diam International	Private Company	France	28.02.2012
Diana S.A.S.	Private Company	France	11.11.2011
Dinamica Ecosolution Ltda	Private Company	Brazil	12.12.2013
Dints International Ltd	Private Company	United Kingdom	23.03.2010
Diseno de Contenedores...	Private Company	Spain	22.07.2013
Diseno y Metalmeccanica...	Private Company	Mexico	20.02.2008
Donbass Fuel-Energy Co...	Private Company	Ukraine	24.05.2007
Doosan Corporation	Private Company	Korea, Repub...	22.04.2014
DOTS Textilvertrieb Gm...	Private Company	Germany	30.04.2014
DS Smith Plc	Public Company	United Kingdom	06.08.2013
Duba-B8 A/S	Private Company	Denmark	09.09.2010
EA-Connect Pte. Ltd.	Private Company	Singapore	22.11.2011
EBARA Corporation	Public Company	Japan	30.06.2009
Ecoatitudo Comercio de...	Private Company	Brazil	07.12.2011
Ecofrigo, S.A. de C.V.	Private Company	Mexico	15.07.2013
Ecopack Bulgaria Jsc	Private Company	Bulgaria	18.12.2007
Ecorodovias Infrastru...	Company	Brazil	30.07.2014
Eczacibasi Holding Co.	Private Company	Turkey	26.05.2006
EDOKIAL	Private Company	France	07.07.2005
EGA Master, S.A,	Private Company	Spain	05.03.2010
Ekornes ASA	Private Company	Norway	16.07.2009
Embafort Embalagem Ind...	Private Company	Brazil	14.02.2012
Emco Marine Ltd.,	Private Company	Israel	01.02.2008
Emgesa S.A. Esp	Private Company	Colombia	17.01.2007
Engro Corporation Limi...	Public Company	Pakistan	13.06.2005
EnviroScience, Inc.	Private Company	United State...	07.08.2013

EOD Contracts Limited	Private Company	United Kingdom	30.10.2006
Ergok Agac ve Metal Is...	Private Company	Turkey	14.04.2014
Ergospazzio, S.A. de C.V.	Private Company	Mexico	29.05.2013
Especialistas Tecnicos...	Private Company	Mexico	03.04.2014
Espuna SAS	Private Company	France	03.02.2006
Estructuras Metalicas ...	Private Company	Spain	01.02.2010
Etiquetas Impresas Eti...	Private Company	Costa Rica	18.11.2010
Euro Mec S.r.l.	Private Company	Italy	24.03.2010
Eurosit S.A.	Private Company	France	20.05.2004
eWork Scandinavia AB	Public Company	Sweden	17.10.2011
Exaprint	Private Company	France	13.07.2011
Exel-NA, S.A. de C.V.	Private Company	Mexico	18.02.2014
FALA Technologies Inc.	Private Company	United State...	04.09.2012
Famoc Depanel S.A.	Private Company	Colombia	27.08.2009
Far East Holding Group...	Private Company	China	06.02.2012
Ferresistemas Integral...	Private Company	Mexico	27.10.2011
Fixa Brindes Comercial...	Private Company	Brazil	29.04.2014
Fluidra, S.A.	Private Company	Spain	16.08.2007
Focus Print Sdn Bhd	Private Company	Malaysia	01.06.2009
Food Keepers	Private Company	Mexico	16.04.2014
Foselev SAS	Private Company	France	14.12.2009
Foshan Shunde Wentelon...	Private Company	China	03.01.2013
Freudenberg Group	Private Company	Germany	17.01.2014
Fyno Precision PTE Ltd.	Private Company	Singapore	27.03.2008
G.S. ACE Industry Co.,...	Private Company	Korea, Repub...	27.02.2014
Gault und Fremont	Private Company	France	06.12.2010
GC Rieber AS	Private Company	Norway	22.12.2010
GDP	Private Company	France	13.12.2011
General Electric Company	Public Company	United State...	10.12.2008
General Printers Limited	Private Company	Kenya	01.10.2008
Gente Oportuna	Private Company	Colombia	15.07.2013
Gerdau Aza S.A.	Private Company	Chile	23.03.2012
Gevaram Quality Envelo...	Private Company	Israel	10.07.2008
GIL Equipamentos Indus...	Private Company	Brazil	14.01.2014
Glory Ltd.	Private Company	Japan	11.03.2014
Gonvarri Corporacion F...	Private Company	Spain	22.01.2014
Granotec Mexico, S.A. ...	Private Company	Mexico	18.10.2013
Greenwood Fabricating ...	Private Company	United State...	27.02.2008
Grontmij	Public Company	Netherlands	20.09.2000
Groupe Paprec	Private Company	France	10.08.2005
Groupe PGS - Palettes ...	Private Company	France	26.03.2008
Groupe Refraco Inc.	Private Company	Canada	24.08.2010
Grupak	Private Company	Mexico	17.11.2011
Grupo Agroindustrial H...	Private Company	Colombia	06.02.2012
Grupo Argos S.A.	Private Company	Colombia	01.11.2013
Grupo Azor Mexico, S.A...	Private Company	Mexico	18.11.2009
Grupo Collado, S.A. de...	Public Company	Mexico	22.11.2011

Grupo Prasa	Private Company	Spain	14.06.2006
Grupo Tampico	Private Company	Mexico	03.07.2013
Grupo Whiteboard	Private Company	Peru	29.02.2012
Gruppo Pro Ceramic S.A...	Private Company	Mexico	03.02.2012
GSF	Private Company	France	15.03.2005
GS-Hydro, S.A.U.	Private Company	Spain	18.07.2011
Gujarat Raffia Industr...	Private Company	India	14.02.2012
Gurelan, S.A.	Private Company	Spain	14.09.2010
Guy Leroy	Private Company	France	18.07.2013
H.O. Sabanci Holding A.S	Private Company	Turkey	18.12.2007
Habegger AG	Private Company	Switzerland	29.12.2009
Handelskompaniet as	Private Company	Norway	01.06.2010
Hans Folsgaard A/S	Private Company	Denmark	12.12.2012
Hayleys PLC	Public Company	Sri Lanka	26.01.2007
HERA Holding Habitat, ...	Private Company	Spain	06.06.2006
Hierros y Metales Tirs...	Private Company	Spain	20.03.2014
Hindustan Platinum Pvt...	Private Company	India	17.07.2008
HL Display AB (publ)	Public Company	Sweden	01.02.2010
HMI Group	Private Company	United State...	10.02.2012
Humanscale	Private Company	United State...	20.01.2010
Iberica de Aparellajes	Private Company	Spain	15.05.2013
ICDAS Celik Enerji Ter...	Private Company	Turkey	18.09.2012
idro meccanica s.r.l.	Private Company	Italy	28.03.2014
Imprimerie CCI (Creati...	Private Company	France	15.03.2013
Imprimerie Chauveau	Private Company	France	06.09.2011
Imprimerie Peau	Private Company	France	15.06.2011
Imprimerie Perroux	Private Company	France	07.09.2011
IMTO	Private Company	Spain	16.05.2012
Inca Tops S.A.	Private Company	Peru	04.02.2013
Industrias Haceb S.A.	Private Company	Colombia	21.05.2013
Industrias de Culiacan...	Private Company	Mexico	06.09.2013
Industrias Ferroplasticas	Private Company	Mexico	16.04.2014
Industrias Mecanoelect...	Private Company	Spain	19.01.2012
Induveca, S.A.	Private Company	Dominican Re...	10.06.2007
Inforpress SL	Private Company	Spain	28.03.2003
INPET S.A.E.C.A.	Private Company	Paraguay	16.04.2014
Instant Upright	Private Company	Ireland	01.10.2013
INTAF - Industrias y T...	Private Company	Spain	29.01.2013
Interpipe	Private Company	Ukraine	02.06.2006
Interplast Limited	Private Company	Ghana	26.07.2003
Intracom Holdings S.A.	Private Company	Greece	10.06.2008
ITC Limited	Public Company	India	07.04.2008
Jodel - Produtos Quimi...	Private Company	Portugal	14.04.2014
Joint Venture Katrabel...	Private Company	Belarus	18.12.2006
Josef Skrkon - Techpla...	Private Company	Czech Republic	23.11.2010
Kaba Group	Private Company	Switzerland	12.06.2013
Kalite Sistem Laborato...	Private Company	Turkey	29.11.2007

Kariwala Industries Li...	Private Company	India	21.02.2014
Kendrion N.V.	Public Company	Netherlands	09.09.2009
Kentaur A/S	Private Company	Denmark	30.09.2011
Kenya Bixa Ltd.	Private Company	Kenya	15.03.2013
Kern AG	Private Company	Switzerland	23.11.2010
Keshavlal Mangubhai und Co.	Private Company	India	16.01.2008
Kibar Holding A.S.	Private Company	Turkey	12.06.2013
Kinjo Rubber Co., Ltd.	Private Company	Japan	16.09.2010
Kinnarps France	Private Company	France	11.12.2008
KIPLAY	Private Company	France	02.09.2008
Kleiner GmbH	Private Company	Germany	27.03.2012
Koc Holding	Public Company	Turkey	05.04.2006
Komatsu Ltd.	Public Company	Japan	07.11.2008
Konecranes Corporation	Public Company	Finland	07.04.2010
Kongsberg Gruppen ASA	Public Company	Norway	31.07.2006
Kordsa Global Endustri...	Public Company	Turkey	19.03.2014
Korea Electric Power I...	Private Company	Korea, Repub...	02.08.2007
Korea Racing Authority	Private Company	Korea, Repub...	08.11.2007
Korea Trade-Investment...	Private Company	Korea, Repub...	30.08.2007
Koroza Packaging Corpo...	Private Company	Turkey	17.11.2011
KPMG, Cardenas Dosal, ...	Private Company	Mexico	09.08.2007
Krishak Bharati Cooper...	Private Company	India	23.08.2005
Kuroda Electric Co., Ltd.	Public Company	Japan	02.03.2011
Kvadrat A/S	Private Company	Denmark	26.04.2013
Labelco A/S	Private Company	Denmark	12.07.2012
Laboratories Quinton	Private Company	Spain	17.07.2013
Laguna Agricola Mecani...	Private Company	Mexico	27.12.2012
Lammhults Design Group AB	Public Company	Sweden	18.02.2014
Latin American Quality...	Private Company	Panama	25.06.2008
Linha Amarela S/A	Private Company	Brazil	21.06.2007
Lintec Corporation	Public Company	Japan	04.04.2011
Longsun Group Co., Ltd.	Private Company	China	03.01.2012
Loredo del Pacifico S....	Private Company	Mexico	29.12.2010
LS Mtron	Private Company	Korea, Repub...	02.09.2010
Mahindra und Mahindra Ltd.	Public Company	India	24.04.2001
Mahroz Textile Industries	Private Company	Pakistan	25.06.2013
MAJENCIA France SA	Private Company	France	25.07.2007
Malaplast Co., Ltd.	Private Company	Thailand	12.05.2008
Mantenimiento y Servic...	Private Company	Spain	29.01.2013
Manufacturas Industria...	Private Company	Mexico	21.08.2012
Manufacturas Metalicas...	Private Company	Mexico	21.12.2011
Martela Oyj	Public Company	Finland	01.08.2012
Marubeni Corporation	Public Company	Japan	25.01.2013
Meca-inox	Private Company	France	16.10.2013
Mecanomatic S.A. de C.V.	Private Company	Mexico	28.09.2011
Mecelec	Public Company	France	14.04.2011
Melitron Corporation	Private Company	Canada	08.04.2008

Mercasid, S. A.	Private Company	Dominican Re...	21.09.2006
Metalite Manufacturing...	Private Company	United State...	14.02.2012
Milcobel CVBA	Private Company	Belgium	01.05.2008
Minipak S.A.S.	Private Company	Colombia	07.12.2011
Miro Seguridad Ltda.	Private Company	Colombia	21.12.2011
Mitsubishi Corporation	Public Company	Japan	20.08.2010
MKB Metallguss GmbH	Private Company	Germany	18.10.2011
Mosaic	Public Company	United State...	25.05.2012
MPCProkim Industrie	Private Company	Tunisia	29.12.2009
MSM Group AG	Private Company	Switzerland	21.05.2003
MTOP	Private Company	France	24.04.2008
Multiceras, S.A. de C.V.	Private Company	Mexico	04.10.2012
Mytilneos Holdings	Private Company	Greece	18.06.2008
Nabtesco Corporation	Public Company	Japan	01.04.2014
Nankai Co., Ltd.	Private Company	Japan	26.05.2010
Nissha Printing Co., Ltd.	Public Company	Japan	03.04.2012
Noha Nyamedjo und Associ...	Private Company	Cameroon	01.05.2014
Nor Tekstil AS	Private Company	Norway	20.11.2012
Noritz Corporation	Public Company	Japan	01.12.2012
North Plastik Srl.	Private Company	Italy	15.09.2011
Nybo Workwear A/S	Private Company	Denmark	17.01.2011
Ofipartes del Caribe SAS	Private Company	Colombia	03.10.2012
Oil Recovery Systems C...	Private Company	Colombia	21.02.2013
Olliet SAS	Private Company	France	19.06.2013
Orkla ASA	Public Company	Norway	06.07.2005
OTS Assembly Srl	Private Company	Italy	04.11.2010
Outils Oceans	Private Company	France	02.12.2013
Ozka Tyre and Rubber Co.	Private Company	Turkey	19.12.2007
Pakmarkas	Private Company	Lithuania	13.06.2005
Palfinger AG	Private Company	Austria	13.02.2013
Palladio Zannini Indus...	Private Company	Italy	23.05.2012
Pancrop Commercial Co....	Private Company	Sudan	26.01.2007
Paramount Garment Work...	Private Company	Zimbabwe	24.03.2014
Partner Trade Nigeria ...	Private Company	Nigeria	31.03.2014
Patmar Industria e Com...	Private Company	Brazil	12.09.2008
Perfumes Sodexim, S.A....	Private Company	Mexico	19.08.2013
Philake Metal Corporation	Private Company	Philippines	07.05.2012
Phoenix Contact Asia-P...	Private Company	China	13.12.2006
Phong Phu Internationa...	Private Company	Viet Nam	10.06.2010
PIAD Precision Casting...	Private Company	United State...	27.02.2008
Pick n Pay	Private Company	South Africa	14.04.2008
Plant Bem Fertilizante...	Private Company	Brazil	09.12.2011
Plasto SAS	Private Company	France	14.09.2010
Plurisol	Private Company	France	21.09.2012
Polaris International ...	Private Company	Egypt	31.12.2013
Power Plus Company (Pv...	Private Company	Pakistan	09.09.2010
Praxis	Private Company	Denmark	20.12.2009

Press Corporation	Public Company	Malawi	01.04.2004
Procesos y Manufactura...	Private Company	Mexico	29.05.2013
Progressive Traders (P...	Private Company	Pakistan	09.09.2010
PT Trakindo Utama	Private Company	Indonesia	11.06.2012
PT. Singaland Asetama ...	Private Company	Indonesia	02.05.2011
PT. Tandan Sawita Papu...	Private Company	Indonesia	02.05.2011
Pure Impression	Private Company	France	20.01.2011
Pyroll	Private Company	Finland	22.11.2010
Quality Industries	Private Company	United State...	22.07.2010
Quito Inor Flowers Tra...	Private Company	Ecuador	27.07.2012
R R Kabel Ltd.	Private Company	India	17.07.2008
RundM Manufacturing Co.,...	Private Company	United State...	20.11.2008
Rathgeber GmbH und Co. KG	Private Company	Germany	01.03.2011
Reltex Tarpaulins (Afr...	Private Company	Kenya	20.02.2014
Rideau Recognition Sol...	Private Company	Canada	11.02.2005
Riegos Agrícolas Espan...	Private Company	Spain	22.07.2008
Rio Forte Investments ...	Private Company	Luxembourg	05.04.2011
Riopaila Castilla S.A.	Private Company	Colombia	24.05.2010
Rocha e Zubioli Ltda	Private Company	Brazil	20.12.2013
Rodamientos Bulnes, S.L.	Private Company	Spain	06.11.2013
Rubberart Artefatos de...	Private Company	Brazil	03.10.2013
Rubicon Global	Private Company	United State...	12.10.2011
Rudholm and Haak AB	Private Company	Sweden	16.08.2012
S.K.Corporation	Private Company	Pakistan	07.10.2010
SA Maugein Imprimeurs	Private Company	France	14.07.2011
Sachsenballon Produkti...	Private Company	Germany	07.11.2013
Sacred	Private Company	France	09.11.2011
SAESPRO, S.A. de C.V.	Private Company	Mexico	18.02.2014
San Shun Spring - Shan...	Private Company	China	11.09.2007
SARL Bernadet	Private Company	France	27.03.2014
SAVCO	Private Company	France	22.06.2012
SCSK Corporation	Private Company	Japan	14.06.2007
Seguin Moreau et Cie SAS	Private Company	France	20.08.2007
SERACIS Ltda.	Private Company	Colombia	13.02.2014
SERIFOS	Private Company	France	04.10.2013
Servicios de Mantenimi...	Private Company	Mexico	17.08.2012
Servicios Integrales d...	Private Company	Spain	04.02.2008
Sesa Internacional S.A.	Private Company	Argentina	28.11.2006
SFS Holding AG	Private Company	Switzerland	29.10.2010
Shanghai Qiqi printing...	Private Company	China	29.12.2010
Shanghai Wandewee Plas...	Private Company	China	08.01.2010
Sheargold Limited	Private Company	United Kingdom	08.04.2014
SIDAMO	Private Company	France	09.09.2013
Siderca	Private Company	Argentina	21.07.2009
Sigdo Koppers	Public Company	Chile	09.03.2007
Sitour Merchandising	Private Company	France	14.06.2012
SNT (Societe Nouvelle ...	Private Company	France	17.12.2010

Solarig	Private Company	Spain	11.02.2008
Sotral S.P.A	Private Company	Italy	14.06.2006
Spectre A/S	Private Company	Denmark	16.09.2010
Steelcase	Private Company	France	18.08.2009
STEPPEN (Step Yazim Ge...	Private Company	Turkey	08.10.2008
Sterlite Industries (I...	Private Company	India	24.07.2008
stiplastics	Private Company	France	13.05.2009
Stork Food und Dairy Sys...	Private Company	Netherlands	25.02.2011
Streamline Cartons Pty...	Private Company	Australia	14.09.2009
Sumcab Inversiones, S.L.	Private Company	Spain	06.06.2013
Suministros Industrial...	Private Company	Spain	22.06.2012
Sumitomo Corporation	Public Company	Japan	06.03.2009
Sunteca Cortinas y Per...	Private Company	Colombia	03.10.2012
Sustainable Living Fab...	Private Company	Australia	25.03.2008
Suzhou Tianjian Bamboo...	Private Company	China	18.12.2013
System Capital Management	Private Company	Ukraine	11.08.2006
TAG Systems	Private Company	Andorra	09.11.2011
Talent Plastics Herrlj...	Private Company	Sweden	15.11.2012
Tata International Lim...	Private Company	India	30.08.2002
Tata Motors Ltd.	Public Company	India	23.09.2002
Technibond Ltd	Private Company	United Kingdom	05.10.2010
Tecnologia Senaletica ...	Private Company	Spain	11.02.2010
Tecnologica de Aliment...	Private Company	Peru	30.03.2009
Tecnostamp Triulzi Gro...	Private Company	Italy	18.06.2010
Thai British Security ...	Public Company	Thailand	09.10.2002
The Linde Group	Private Company	Germany	05.05.2006
Thermopatch	Private Company	Netherlands	20.07.2012
Thread Works (Pvt) Ltd	Private Company	Sri Lanka	03.03.2014
ThyssenKrupp AG	Private Company	Germany	04.11.2011
TianJin JinRong TianYu...	Private Company	China	04.10.2011
Tirme S.A.	Private Company	Spain	19.02.2010
Tolaram Corporation Pt...	Private Company	Singapore	18.07.2008
TOMPLA SOBRE EXPRES, S.L.	Private Company	Spain	29.12.2009
Tontec International L...	Private Company	China	03.03.2008
Topcon Corporation	Public Company	Japan	05.10.2007
Toppan Printing Co., Ltd.	Public Company	Japan	13.09.2006
Trelleborg AB	Public Company	Sweden	13.03.2007
Tropicoir Lanka (Pvt) ...	Private Company	Sri Lanka	25.10.2011
Truston Technologies, ...	Private Company	United State...	18.10.2013
UAB Scandye	Private Company	Lithuania	14.02.2013
UAB Traidenis	Private Company	Lithuania	14.06.2005
Ummetalsalam Company	Public Company	Iraq	13.12.2013
Uniformes Parana	Private Company	Brazil	27.11.2013
Unilever de Argentina	Private Company	Argentina	17.03.2005
Union Plastica Ltda.	Private Company	Colombia	08.05.2008
Universal Air Filter Co.	Private Company	United State...	20.06.2013
Valley Fastener Group	Private Company	United State...	02.07.2008

Van Gansewinkel Groep	Private Company	Netherlands	09.09.2011
Vangsgaard A/S	Private Company	Denmark	13.10.2009
VAPTECH LTD.	Public Company	Bulgaria	09.09.2009
Veolia Environnement	Public Company	France	10.05.2002
Verona Lamiere	Private Company	Italy	03.02.2009
VIP Packaging	Private Company	Australia	07.02.2007
Votorantim Industrial S/A	Private Company	Brazil	25.07.2011
VSP Technology (M) Sdn...	Private Company	Malaysia	23.03.2009
Warner Safety Equipmen...	Private Company	United Arab ...	29.11.2013
Wartsila Corporation	Public Company	Finland	07.07.2009
Wernerfelt A/S	Private Company	Denmark	24.10.2013
Westminster Shanghai M...	Private Company	China	17.01.2008
Wilkhahn Wilkening und H...	Private Company	Germany	14.12.2007
Witzenmann GmbH	Private Company	Germany	12.05.2011
World Forum Convention...	Private Company	Netherlands	14.05.2008
Xylem Inc.	Public Company	United State...	10.06.2002
Yasin Knittex Industri...	Private Company	Bangladesh	22.04.2013
Yobel SCM	Private Company	Peru	08.08.2012
Zannini S.p.A.	Private Company	Italy	22.12.2011
Zona Franca de Bogota ...	Private Company	Colombia	25.09.2007
Zorlu Holding A/S	Private Company	Turkey	19.12.2007

Anhang IV. Screenings: Global Reporting Initiative

Section: Aerospace and Defense

Unternehmen	Land	Status
All Nippon Airways Co....	Japan	2013 GRI - G3.1 A+ Third-party-checked Airport Op.
Fraport AG	Germany	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked Airport Op.
Incheon International ...	Korea, Rep.	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked Airport Op.
Korea Airports Corpora...	Korea, Rep.	2013 GRI - G3.1 A+ Third-party-checked Airport Op.
Korean Air	Korea, Rep.	2013 GRI - G3.1 A+ Self-declared

Section: Automobiles and Parts

Unternehmen	Land	Status
BMW AG	Germany	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked
Daimler AG	Germany	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked
Diesel und Motor Engi- nee...	Sri Lanka	2013 GRI - G3.1 A+ Third-party-checked Integrated
Fiat Argentina S.A.	Argentina	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked
Grupo Gestamp	Spain	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked Integrated
Hyundai Motor Company	Korea, Repub.	2013 GRI - G3.1 A+ Third-party-checked
KIA Motors Corporation	Korea, Repub.	2013 GRI - G3.1 A+ Third-party-checked
MAN SE	Germany	2013 GRI - G3 A+ GRI-checked
Pirelli und C. S.p.A.	Italy	2013 GRI - G3.1 A+ Third-party-checked
PSA Peugeot Citroen	France	2013 GRI - G3 A+ GRI-checked
Volkswagen AG	Germany	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked

Section: Technology and Hardware

Unternehmen	Land	Status
Intel Corporation	United State...	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked
Koninklijke Philips El...	Netherlands	2013 GRI - G3.1 A+ Self-declared Integrated
LG Electronics, Inc.	Korea, Re- pub...	2013 GRI - G3.1 A+ Third-party-checked
Siemens AG	Germany	2013 GRI - G3 A+ GRI-checked
SK hynix Inc.	Korea, Re- pub...	2013 GRI - G3.1 A+ Third-party-checked Integrated
UMC Electronics Co., Ltd	Japan	2013 GRI - G3.1 A+ Third-party-checked

Section: General Industrials

Unternehmen	Land	Status
Abengoa	Spain	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked
Abertis Infraestructuras	Spain	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked Airport Operators
Anas S.p.A.	Italy	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked Integrated

Barloworld	South Africa	2013 GRI - G3.1 A+ Self-declared Integrated
Bayer AG	Germany	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked
Befesa Medio Ambiente,...	Spain	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked
Carvajal Internacional SA	Colombia	2013 GRI - G3 A+ Third-party-checked
Ecorodovias Infraestru...	Brazil	2013 GRI - G3.1 A+ Self-declared
Fluidra, S.A.	Spain	2013 GRI - G3 A+ GRI-checked Integrated
ITC Limited	India	2013 GRI - G3 A+ GRI-checked Food Processing
Mahindra und Mahindra Ltd.	India	2013 GRI - G3.1 A+ GRI-checked Financial Services
Mitsubishi Corporation	Japan	2013 GRI - G3 A+ Self-declared Mining und Metals
Tata Motors Ltd.	India	2013 GRI - G3 A+ Third-party-checked

Anhang V. Identifizierte Nachhaltigkeitsindikatoren

Folgende Nachhaltigkeitsindikatoren, die einen direkten und indirekten Bezug zur Entwicklung nachhaltiger Produkte aufweisen, wurden aus offiziell anerkannten Indikatoren identifiziert:

#	Category	Sub-category	Indicator	Country	Year
1	Ecological	Recycling	Amount of recycled and reused wastes	Mexico	2000
2	Ecological	Recycling	Ratio of Waste Recycled	Taiwan	2002
3	Ecological	Recycling	Ratio of reused or recycled waste to total waste	Thailand	2005
4	Ecological	Recycling	Materials recycling	UK	2004
5	Ecological	Recycling	Amount of secondary/ recycled aggregates used compared with virgin aggregates	UK	2004
6	Ecological	Recycling	Waste recycling and reuse	UN	2001
7	Ecological	Chemicals	Prohibited or strictly-restricted chemical substances	Mexico	2000
8	Ecological	Chemicals	Hazardous chemicals, quantity	Sweden	2006
9	Ecological	Chemicals	Regulate prohibited or strictly prohibited chemicals	Taiwan	2002
10	Ecological	Noise	Noise levels	UK	2004
11	Ecological	Resources	Use of renewable energy sources	Finland	2006
1	Economical	Waste generation and management	Harmful waste (kg/person/year)	East Asia	2003
2	Economical	Material use	Material input	Austria	2002
3	Economical	Material use	Energy and raw materials productivity	Germany	2002
4	Economical	Material use	Materials Use per Dollar of Investment	US	2001
5	Economical	Material use	Intensity of material use	UN	2001
6	Economical	Transportation	Mileage	Austria	2002
7	Economical	Transportation	External costs of transport	Austria	2002
8	Economical	Transportation	Traffic-related emissions	Austria	2002
9	Economical	Transportation	Transport emissions (CO ₂ , CO, PM10, NO _x , NMVOC and SO ₂)	Denmark	2002
10	Economical	Transportation	Transporting goods, person (ton/km, people/km)	East Asia	2003
11	Economical	Energy use	Energy and raw materials productivity	Germany	2002
12	Economical	Energy use	Energy use Intensity	Taiwan	2002

13	Economical	Energy use	Intensity of energy use	UN	2001
14	Economical	Eco-business	Number of products with eco-label	Austria	2002
15	Economical	Eco-business	Products that were produced under environmental or social standards	Belgium	2005
16	Economical	Eco-business	Feasibility of eco-labels	Taiwan	2002
17	Economical	Business and industry	Labor Productivity in Manufacturing Industry	Taiwan	2002
18	Economical	Eco-performance	Labour productivity	Australia	2006
19	Economical	Eco-performance	Productivity Indicator	France	2004
1	Social	Health	Satisfaction with health	Germany	2002

Anhang VI. Identifizierte Informationsobjekte

Informationsobjekt
2D,3D- Feingestalt
Anforderungsliste
Funktionsstruktur
Liste im Produkt enthaltener umweltgefährdender Stoffe
Kostenschätzung
Produktstruktur
Stückliste
Bestimmung Relevanz Phasen Produktlebenszyklus
Demontageunterlagen
EOL-Szenario
Fertigungs- und Montageunterlagen
Konzept der Nutzungsphase
Materialunterlagen
Produktnutzungsverhalten
Verpackungs- und Transportunterlagen
Ersatzteilliste/After-Sales Informationen
Gesetzliche Rahmenbedingungen
Häufige Defekte
Analyse Ausgangsprodukt
Analyse Produktkomponenten
Analyse Produktkonzept
Marktanalyse
Ökologischer Indikator Produktkomponenten
Bewertung der Produktkomponenten
Bewertung Produktkonzepte
Verbesserungspotenziale Produktkomponenten
Verbesserungspotenziale Produktkonzept

Anhang VII. Wertelisten für die SIO in Siemens PLM Teamcenter 8.3

SIO 2.1 Fertigungsart

Wert	Beschreibung	Bedingung
1	Aluminium - Druckguss	isTrue
2	Aluminium - Blech Tiefziehen	isTrue
3	Grauguss	isTrue
4	Kunststoff - Spritzguss	isTrue
5	Stahl - Blech Stanzen / Biegen	isTrue
6	Stahl - Blech Tiefziehen	isTrue
7	Stahl - Drehen	isTrue
8	Stahl - Guss (legiert)	isTrue

SIO 2.1 Herstellungsland

Wert	Beschreibung	Bedingung
1	Belgien	isTrue
2	Bulgarien	isTrue
3	Dänemark	isTrue
4	Deutschland	isTrue
5	Estland	isTrue
6	Finnland	isTrue
7	Frankreich	isTrue
8	Griechenland	isTrue
9	Irland	isTrue
10	Italien	isTrue
11	Kroatien	isTrue
12	Lettland	isTrue
13	Litauen	isTrue
14	Luxemburg	isTrue
15	Malta	isTrue
16	Niederlande	isTrue
17	Österreich	isTrue
18	Polen	isTrue
19	Portugal	isTrue
20	Rumänien	isTrue
21	Schweden	isTrue
22	Slowakei	isTrue
23	Slowenien	isTrue
24	Spanien	isTrue
25	Tschechien	isTrue
26	Ungarn	isTrue
27	Vereinigtes Königreich	isTrue
28	Zypern	isTrue

SIO 4.2 Transportart

Wert	Beschreibung	Bedingung
<input checked="" type="radio"/> 1	Transportmittel Flugzeug	↕ ↕ isTrue
<input checked="" type="radio"/> 2	Transportmittel LKW	↕ ↕ isTrue
<input checked="" type="radio"/> 3	Transportmittel Schiff	↕ ↕ isTrue
<input checked="" type="radio"/> 4	Transportmittel Zug	↕ ↕ isTrue

SIO 5.2 End-of-Life Abwicklung

Wert	Beschreibung	Bedingung
<input checked="" type="radio"/> 0	keine	↕ ↕ isTrue
<input checked="" type="radio"/> 1	wiederverwenden	↕ ↕ isTrue
<input checked="" type="radio"/> 2	aufarbeiten	↕ ↕ isTrue
<input checked="" type="radio"/> 3	reparieren	↕ ↕ isTrue
<input checked="" type="radio"/> 4	recyclen	↕ ↕ isTrue
<input checked="" type="radio"/> 5	entsorgen	↕ ↕ isTrue

SIO 6.1 Lohnniveau

Wert	Beschreibung	Bedingung
<input checked="" type="radio"/> 1	niedrig	↕ ↕ isTrue
<input checked="" type="radio"/> 2	mittel	↕ ↕ isTrue
<input checked="" type="radio"/> 3	hoch	↕ ↕ isTrue

Basierend auf umfangreichen Analysen wird sowohl der wissenschaftliche Forschungsbedarf als auch der industrielle Handlungsbedarf für eine neue Vorgehensweise zur Entwicklung nachhaltiger Produkte beschrieben – unter Berücksichtigung der Ebenen Prozess und Organisation, Entwicklungsaktivitäten und -methoden, Informationstechnologien und Werkzeuge sowie Informationsartefakte und -standards. Diese Ebenen sind integrativ zu betrachten und erfordern ein ideales Zusammenspiel. Vor diesem Hintergrund wird ein neues Vorgehensmodell vorgeschlagen, das so genannte Regelkreise zur Verbesserung der Konstruktion, zur verbesserten Bewertung des Konstruktionsmodells und letztendlich zur verbesserten Entscheidungsfindung beinhaltet. Das neue Vorgehensmodell wird konzeptionell beschrieben und exemplarisch umgesetzt. Es unterstützt Produktentwicklerinnen und -entwickler gezielt darin, ihrer Verantwortung für eine nachhaltige Entwicklung nachzukommen und Produkte über den gesamten Lebensweg ressourcenschonend, umweltfreundlich und sozialverträglich zu gestalten. Zugleich macht es den Einfluss deutlich, den die Produktentwicklung auf die Nachhaltigkeit eines Produktes hat.

ISBN 978-3-8396-1271-2



9 783839 612712

FRAUNHOFER VERLAG