

Ein Verfahren zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung unter Einsatz emergenter Technologien

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Nico Pastewski
aus Berlin

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Engelbert Westkämper
Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Tag der Einreichung: 22. Juni 2011
Tag der mündlichen Prüfung: 02. November 2011

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT
2011

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath



Universität Stuttgart

Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT



Fraunhofer

IAO

Nico Pastewski

Ein Verfahren zur ressourcen-
effizienzorientierten
Produktweiterentwicklung
unter Einsatz emergenter
Technologien

Nr. 515

JOST-JETTER VERLAG

Fachverlag · 71296 Heimsheim

Dr.-Ing. Nico Pastewski

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN 978-3-939890-86-7

Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost-Jetter Verlag, Heimsheim 2011.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand überwiegend während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT) der Universität Stuttgart und dem Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Leiter des Instituts für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT) und des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart, danke ich für die Annahme dieser Arbeit, die wissenschaftliche Betreuung und die Unterstützung meiner Tätigkeit am Institut. Herrn Prof. Dr.-Ing. Engelbert Westkämper, Leiter des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetriebslehre (IFF) und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart, danke ich für die Übernahme des Mitberichtes.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Warschat, Institutsdirektor des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), für die Unterstützung bei der Themenausrichtung. Weiterhin möchte ich allen ehemaligen und aktiven Kollegen am Fraunhofer IAO danken, die auf unterschiedliche Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Allen voran danke ich Dr. Claus Lang-Koetz und Dr. Daniel Heubach für die wertvollen Diskussionen, das Gegenlesen und die so essentielle Ermunterung zur kontinuierlichen Arbeit an der Promotion. Weiterhin danke ich vielen Studenten, allen voran Cengizhan Aydin und Reiner Erhardt für die engagierte Mitarbeit und die Unterstützung bei der Fehlerkorrektur des Textes.

Ebenso gilt mein Dank Holger Rohn für die intensiven Jahre der Zusammenarbeit, in denen ich so viel lernen durfte im Rahmen von „MaRes“ und darüber hinaus.

Meiner Frau Claudia danke ich für ihre Unterstützung in jeder erdenklichen Hinsicht. Ihr Motivieren war für unser gemeinsames Projekt unentbehrlich. Ein großes Dankeschön gebührt auch meinen Eltern und meiner Schwester, die mir die Startvoraussetzungen für diesen beruflichen Werdegang ermöglichten und mich bei der Promotion auf emotionale Weise unterstützten.

Stuttgart, im November 2011

Nico Pastewski

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	20
1.1 Einführung	20
1.2 Defizite bestehender Verfahren	21
2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	23
2.1 Zielsetzung	23
2.2 Aufbau und Kapitel	23
3 Stand des Wissens	25
3.1 Ressourceneffizienz als Herausforderung für Unternehmen	25
3.1.1 Grundlegende Begriffe und Aufgabenstellung	25
3.1.2 Der verantwortungsbewusste Umgang mit Ressourcen	29
3.1.2.1 Zusammenhänge der globalen Rohstoffnutzung	30
3.1.2.2 Beitrag zur Ressourceneffizienz seitens Unternehmen	31
3.1.3 Bedeutung der Ressourceneffizienz für Unternehmen	32
3.1.3.1 Anforderungen an die unternehmerische Ressourcennutzung	32
3.1.3.2 Chancen und Nutzen einer effizienten Ressourcennutzung	34
3.1.4 Umsetzung von Ressourceneffizienz in Unternehmen	36
3.1.4.1 Handlungsorientierte Ansätze für Ressourceneffizienz	37
3.1.4.2 Technische Ansätze für Ressourceneffizienz	38
3.1.4.3 Hemmnisse einer effizienten Ressourcennutzung	41
3.1.5 Zusammenfassung und Ableitung der Problemstellung	43
3.2 Ressourceneffizienzorientierte Technologiebewertung	43
3.2.1 Technologien managen.....	43
3.2.1.1 Systematisierung von Technologien.....	44
3.2.1.2 Entwicklungspotenziale von Technologien	45
3.2.1.3 Nachhaltigkeitsorientierte Technologiegestaltung	45
3.2.1.4 Technologieeinsatz nach Maßgaben der Ressourceneffizienz	47
3.2.2 Technologienbewertung im Sinne der Ganzheitlichkeit	47
3.2.3 Methoden der Technologiebewertung	49
3.2.3.1 Nutzenbezogene Technologiebewertungsmethoden.....	49
3.2.3.2 Ressourceneffizienzbezogene Technologiebewertungsmethoden	51
3.2.4 Vergleich der beschriebenen Methoden.....	55
3.2.5 Zusammenfassung von Defiziten und Anforderungen	55
3.3 Ressourceneffizienzorientierte Produktweiterentwicklung	57
3.3.1 Technisches Produktverständnis	57
3.3.1.1 Technische Systeme	57
3.3.1.2 Dekomposition von Produkten	58

3.3.2	Produktentwicklung und Ressourceneffizienz	58
3.3.2.1	Aufgaben der Produktentwicklung.....	58
3.3.2.2	Integration der Ressourceneffizienz	59
3.3.3	Ansätze der Produktweiterentwicklung.....	62
3.3.3.1	Ansätze für bestimmte Anforderungen (Design to X)	62
3.3.3.2	TRIZ als kreativer Problemlösungsprozess	63
3.3.3.3	Vergleich der beschriebenen Ansätze.....	64
3.3.4	Zusammenfassung von Defiziten und Anforderungen	64
3.4	Zusammenführung der Defizite	66
4	Konzeption eines Verfahrens zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung unter Einsatz emergenter Technologien	67
4.1	Ressourceneffizienzbezogenes Technologiepotenzialmodell.....	67
4.1.1	Relevante Optimierungsansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz in Investitionsgütern.....	68
4.1.1.1	Substitution von Ressourcen.....	68
4.1.1.2	Steigerung der Effizienz	69
4.1.1.3	Minderung von Abfall / Ausschuss	69
4.1.1.4	Verlängerung der Lebensdauer.....	69
4.1.1.5	Optimierung der Kreislauffähigkeit	70
4.1.2	Beispiele für relevante Potenziale von Technologien zur Steigerung der Ressourceneffizienz in Investitionsgütern	70
4.1.3	Definition der Modellelemente für das Verfahren.....	73
4.1.3.1	RE-Parameter.....	74
4.1.3.2	RE-Grundprinzipien	75
4.1.3.3	RE-Standardlösungen.....	76
4.1.4	Verknüpfung der Modellelemente des Verfahrens.....	76
4.2	Grundlagen des Verfahrens	79
4.2.1	Bestandteile des Verfahrens	79
4.2.2	Struktur des Verfahrens	79
4.2.3	Charakterisierung des Verfahrens.....	80
4.3	Anforderungen an das Verfahren	81
4.3.1	Übergreifende Anforderungen.....	81
4.3.2	Problemstellungsbezogene Anforderungen.....	82
5	Entwicklung des Verfahrens zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung unter Einsatz emergenter Technologien	83
5.1	Phase I: Definition der Zielstellungen.....	83
5.1.1	Ziel der Phase I.....	83

5.1.2	Methodisches Vorgehen	83
5.1.2.1	Schritt I.a: Auswahl Analysegegenstand	83
5.1.2.2	Schritt I.b: Definition Zielstellungen	84
5.1.3	Ergebnisse der Verfahrensphase	85
5.2	Phase II: Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme	86
5.2.1	Ziel der Phase II	86
5.2.2	Methodisches Vorgehen	86
5.2.2.1	Schritt II.a: Schwachstellenanalyse	86
5.2.2.2	Schritt II.b: Definition Produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktion	90
5.2.3	Ergebnisse der Verfahrensphase	90
5.3	Phase III: Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen	90
5.3.1	Ziel der Phase III	90
5.3.2	Methodisches Vorgehen	91
5.3.2.1	Schritt III.a: Ermittlung abstrakter Lösungen	91
5.3.2.2	Schritt III.b: Definition Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktion	93
5.3.2.3	Schritt III.c: Recherche Lösungsprinzipien	94
5.3.3	Ergebnisse der Verfahrensphase	95
5.4	Phase IV: Ganzheitliche Bewertung der Lösungen	96
5.4.1	Ziel der Phase IV	96
5.4.2	Methodisches Vorgehen	96
5.4.2.1	Schritt IV.a: Funktionaliätsbewertung	97
5.4.2.2	Schritt IV.b: Ressourceneffizienzbewertung	101
5.4.2.3	Schritt IV.c: Kostenbewertung	107
5.4.3	Ergebnisse der Verfahrensphase	109
5.5	Phase V: Planung der Maßnahmen	109
5.5.1	Ziel der Phase V	109
5.5.2	Methodisches Vorgehen	109
5.5.2.1	Schritt V.a: Nutzenbetrachtung	109
5.5.2.2	Schritt V.b: Entscheidung vorbereiten	112
5.5.3	Ergebnisse der Verfahrensphase	114
5.6	Zusammenfassung des Verfahrens	114
6	Umsetzung des Verfahrens	117
6.1	Anwendung des Verfahrens bei einem Hersteller im Bereich Verpackungstechnik	117
6.1.1	Ausgangssituation im Unternehmen	117
6.1.2	Beschreibung der Anwendung	117
6.1.2.1	Umsetzung der Phase I: Definition der Zielstellungen	117

6.1.2.2 Umsetzung der Phase II: Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme	118
6.1.2.3 Umsetzung der Phase III: Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen	121
6.1.2.4 Umsetzung der Phase IV: Ganzheitliche Bewertung der Lösungen.....	124
6.1.2.5 Umsetzung der Phase V: Planung der Maßnahmen	128
6.1.3 Nutzen der Anwendung für das Unternehmen Alpha	129
6.2 Anwendung des Verfahrens bei einem Hersteller im Bereich Fahrzeugwäsche	130
6.2.1 Ausgangssituation im Unternehmen.....	130
6.2.2 Beschreibung der Anwendung	130
6.2.2.1 Umsetzung der Phase I: Definition der Zielstellungen	130
6.2.2.2 Umsetzung der Phase II: Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme	131
6.2.2.3 Umsetzung der Phase III: Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen	132
6.2.2.4 Umsetzung der Phase IV: Ganzheitliche Bewertung der Lösungen.....	135
6.2.2.5 Umsetzung der Phase V: Planung der Maßnahmen	136
6.2.3 Nutzen der Anwendung für das Unternehmen Beta	138
6.3 Zusammenfassung der Umsetzung	138
7 Evaluation und Diskussion	139
7.1 Evaluation	139
7.2 Diskussion	141
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	144
8.1 Zusammenfassung	144
8.2 Ausblick	145
9 Abstract.....	147
10 Anhang	149
10.1 Anhang A: Stand des Wissens.....	149
10.1.1 Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien.....	149
10.1.2 Unterstützung des Umweltmanagements.....	150
10.1.3 Methodische Integration der Ressourceneffizienz in Produkte	151
10.2 Anhang B: Konzeption des Verfahrens	155
10.2.1 Entwicklung der Modellelemente.....	155
10.3 Anhang C: Entwicklung des Verfahrens	159
10.3.1 Identifikation der ressourceneffizienzbezogenen Probleme im Produkt.....	159
10.3.2 Bewertung der Ressourceneffizienz.....	161
10.4 Anhang D: Umsetzung des Verfahrens.....	163

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau des Verfahrens.....	24
Abb. 2: Klassifikation der natürlichen Ressourcen im weiteren Sinn (Jörissen et al. 2008)	26
Abb. 3: Priorität der Ressourceneffizienz bei der Entwicklung eines Produkts mittels neuer Technologien gegenüber anderen Strategien (z. B. Funktionalität) im produzierenden Gewerbe [%] (Erhard, Pastewski 2010).....	28
Abb. 4: Lebenszyklusbezogene Betrachtung bei der ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung	29
Abb. 5: Allgemeine und beispielhafte Ressourceneffizienz-beeinflusste Erfolgskriterien für Produkte (Schäppi et al. 2005, angepasst).	36
Abb. 6: Einsatzmöglichkeiten von Umwelttechnologien (übersetzt aus Reid, Miedzinski 2008).	38
Abb. 7: Vier Stufen möglicher Lösungen zur Umsetzung von Ressourceneffizienz im Produkt (vgl. Bierter 2001, Oberender 2006, Charter et al. 2001)	40
Abb. 8: Die für eine ganzheitliche Bewertung von Technologien relevanten drei Dimensionen mit beispielhaften Kriterien	48
Abb. 9: Produkt als System mit Attributen bzgl. der Umgebung und der Funktion als Transformation des Systems von einem Ist-Zustand in einen Soll-Zustand (nach Pahl et al. 2005).....	57
Abb. 10: Umweltlasten eines Produktes (nach Rebitzera et al. 2003)	60
Abb. 11: Bilanzierungsgrenzen der Bewertung im Verfahren.....	67
Abb. 12: Anwendung der Modellelemente RE-Parameter, RE-Grundprinzipien und RE-Standardlösungen des Verfahrens (vgl. Bannert 2008)	73
Abb. 13: Phasen des Verfahrens im Vergleich zu dem Vorgehen in der Produktentwicklung nach VDI 2221 (VDI 1993).....	80
Abb. 14: Schritte von Phase I (Definition der Zielstellungen).....	83
Abb. 15: Schritte von Phase II (Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme)	86
Abb. 16: Funktionslogische Dekomposition am Beispiel einer Reinigungsanlage für Gefäße (in Anlehnung an VDI 1996)	87
Abb. 17: Beschreibungselemente zur Bildung einer oder mehrerer PReF	90
Abb. 18: Schritte von Phase III (Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen)	91
Abb. 19: Bezug der Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktion (TReF) mit einer passenden Produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktion (PReF)	93
Abb. 20: Beispiel für die Beschreibung von Lösungsprinzipien mittels Steckbrief	95
Abb. 21: Schematischer Problemlösungsprozess mit beispielhafter Bestimmung eines Lösungsprinzips für eine Trocknungsanlage.	95
Abb. 22: Schritte von Phase IV (Ganzheitliche Bewertung der Lösungen)	96
Abb. 23: House of Technology zur Bewertung der Funktionalität aller Lösungsprinzipien	98

Abb. 24: Ermittlung von Korrelationsgraden für beispielhafte Beziehungen einzelner Lösungsprinzipien	100
Abb. 25: Darstellung zur Beschreibung der Lebenszyklusphasen mit beispielhaften relevanten Prozessschritten eines Lösungsprinzips	103
Abb. 26: Portfolio zur Bewertung von Risiken im Zusammenhang mit dem Ressourcenbedarf eines Lösungsprinzips am Beispiel „Lithium-Ionen-Batterie“..	107
Abb. 27: Schritte von Phase V (Planung der Maßnahmen)	109
Abb. 28: Beispielhafte Darstellung des ganzheitlichen Nutzens von zwei alternativen Lösungsprinzipien und dem Referenzlösungsprinzip für eine Funktion	112
Abb. 29: Portfolio mit den Dimensionen „Umsetzungsaufwand“ und „Anwendungsattraktivität“ zur Auswahl der Lösungsprinzipien	113
Abb. 30: Bewertung der Funktionalität, Korrelation und Priorität der fünf besonders relevanten Lösungsprinzipien im Unternehmen Alpha	124
Abb. 31: Darstellung des ganzheitlichen Nutzens von Lösungsprinzipien im Unternehmen Alpha	128
Abb. 32: Portfolio zur Auswahl der Lösungsprinzipien im Unternehmen Alpha	129
Abb. 33: Darstellung des ganzheitlichen Nutzens von Lösungsprinzipien im Unternehmen Beta	137
Abb. 34: Portfolio zur Auswahl der Lösungsprinzipien im Unternehmen Beta	137

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Beispielhafte Ressourceneffizienzpotenziale von Nanotechnologien (Bauer et al. 2007)	41
Tab. 2: Methoden der nutzen- und ressourceneffizienzorientierten Technologiebewertung	55
Tab. 3: Defizite und Anforderungen der nutzen- und ressourceneffizienzbezogenen Technologiebewertung	56
Tab. 4: Ansätze zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung	64
Tab. 5: Defizite und Anforderungen der ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung	66
Tab. 6: Ermittelte Ressourceneffizienzpotenziale	71
Tab. 7: Mögliche Varianten an RE-Parametern	75
Tab. 8: Ermittelte RE-Grundprinzipien	76
Tab. 9: Korrelation der RE-Grundprinzipien zu RE-Standardlösungen mit beispielhaften Ansätzen	78
Tab. 10: Unternehmens- und Produkt-Zielstellungen	85
Tab. 11: Lösungs-Zielstellungen	89
Tab. 12: Bewertung der prinzipiellen Eignung der RE-Standardlösungen	92
Tab. 13: Beispiele für die Bewertung und Auswahl der RE-Standardlösungen	93

Tab. 14:	Bewertung des Funktionalitätsgrads der Lösungsprinzipien	99
Tab. 15:	Relevanz der sekundären Bilanzierungsgrenzen in der Ressourceneffizienzbewertung eines Lösungsprinzips	102
Tab. 16:	Beispielhaftes Ergebnis der Ressourcenverbrauchsbewertung für das Lösungsprinzip „Dämmplatte“ und das Referenzlösungsprinzip „Stahlverkleidung“ des Produktes „Autowaschanlage“ und der Funktion „Wärmeableitung vermeiden“	104
Tab. 17:	Einflussfaktoren mit möglichen Projektionen und Szenarios für das Lösungsprinzip „Lithium-Ionen-Batterie“ bezogen auf die Ressource „Lithium“ ...	106
Tab. 18:	Überblick der Nutzenfaktoren eines Lösungsprinzips in Phase V	110
Tab. 19:	Beispielhafte Kriterienbeschreibung	113
Tab. 20:	Übersicht zu Phasen und Schritten des Verfahrens	115
Tab. 21:	Auswahl von Funktionselementen, Funktionen und Schwachstellen der Anlagen des Unternehmens Alpha	119
Tab. 22:	Schwachstellenbeschreibung für das „Heizteil“ im Unternehmen Alpha	120
Tab. 23:	Produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF), Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (TReF) und Identifizierte Lösungsprinzipien des Unternehmens Alpha	122
Tab. 24:	MIPS-Werte (bezogen auf den Verbrauch von abiotischem Material) der Referenzlösung „Reinigen mit Wasser“ (LR18) und des neuen Lösungsprinzips „Reinigen mit CO ₂ “ (L18) des Unternehmens Alpha	125
Tab. 25:	Übersicht der <i>repräsentativen Kennzahlen</i> der Bewertung aller Lösungsprinzipien des Unternehmens Alpha (Lebensdauer der Anlage beträgt zehn Jahre).....	127
Tab. 26:	Auswahl von Funktionselementen, Funktionen und Schwachstellen der Selbstbedienungswaschanlage des Unternehmens Beta	131
Tab. 27:	Produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF), Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (TReF) und Identifizierte Lösungsprinzipien des Unternehmens Beta	133
Tab. 28:	Übersicht der <i>repräsentativen Kennzahlen</i> der Bewertung aller Lösungsprinzipien des Unternehmens Beta (Lebensdauer der Anlage beträgt zehn Jahre).....	136
Tab. 29:	Zusammenfassung der Anforderungen und ihr relativer Grad der Erfüllung bei den Anwendern	140
Tab. 30:	Globaler Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien im Jahr 2006 und 2030 im Verhältnis zur gesamten heutigen Weltproduktion des jeweiligen Rohstoffs (Angerer et al. 2009)	149
Tab. 31:	Methodenklassen zur Unterstützung der betrieblichen umweltrelevanten Aktivitäten (vgl. Eckardt 2007).....	150
Tab. 32:	Übersicht zu geläufigen IT-Lösungen zur Unterstützung des	

	Umweltmanagements (Eckhardt 2007)	150
Tab. 33:	Weitere gängige Methoden der nutzen- und ressourceneffizienzbezogenen Technologiebewertung	152
Tab. 34:	Weitere gängige Ansätze der ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung	153
Tab. 35:	Praxisnahe Strategien des Ökodesigns (vgl. Brezet, van Hemel 1997, Birkhofer 2000, Wimmer 2004)	155
Tab. 36:	Zusammenstellung von Technologiefeldern und Technologien mit Ressourceneffizienzpotenzial.....	156
Tab. 37:	Korrelation der RE-Parametern zu geeigneten RE-Grundprinzipien mit beispielhaften Kurzerklärungen.....	158
Tab. 38:	Ressourceneffizienz-Checkliste zur Auswahl eines Produktes (vgl. Rohn et al. 2009)	159
Tab. 39:	Ressourceneffizienz-Checkliste mit beispielhaften Schwachstellen (vgl. Rohn et al. 2007).....	160
Tab. 40:	Herausforderungen der dreidimensionalen Bewertung eines Lösungsprinzips....	161
Tab. 41:	Das Rohstoffversorgungs-Risiko-Rating des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln (Stand 2005) (Bardt 2008)	162
Tab. 42:	Beispielhaft ausgefüllter Gesprächsleitfaden für das Unternehmens Alpha	163
Tab. 43:	MIPS-Werte der Referenzlösung „Reinigen mit Wasser“ (LR18) und des alternativen Lösungsprinzips „Reinigen mit CO ₂ “ (L18) des Unternehmens Alpha (Lebensdauer der Anlage beträgt 10 Jahre)	165
Tab. 44:	Kapitalwerte der Referenzlösung „Reinigen mit Wasser“ (LR18) und des alternativen Lösungsprinzips „Reinigen mit CO ₂ “ (L18) des Unternehmens Alpha (Lebensdauer der Anlage beträgt 10 Jahre)	170

Formelverzeichnis

Formel 1:	Definition Ressourceneffizienz (in Anlehnung an WBCSD 2000).....	27
Formel 2:	Berechnung des Materialinput pro Serviceeinheit	54
Formel 3:	Berechnung der prinzipiellen Eignung einer RE-Standardlösung für eine PReF....	92
Formel 4:	Berechnung des Funktionalitätsgrads eines Lösungsprinzips	99
Formel 5:	Berechnung der Priorität eines Lösungsprinzips	100
Formel 6:	Berechnung des Kapitalwertes.....	108

Abkürzungsverzeichnis

A	Anwendbarkeit
Abb.	Abbildung
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie eV
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung

bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
C	Konformität
ca.	circa
CNT	molekulare Nanoröhren aus Kohlenstoff (englisch: carbon nanotubes)
CSR	Unternehmerische Gesellschaftsverantwortung (englisch: Corporate Social Responsibility)
d. h.	das heißt
Demea	Deutsche Materialeffizienzagentur
Dena	Deutsche Energieeffizienzagentur
DJSI	Dow Jones Sustainability Index
E	Eignung
EI	Eco-Indicator
et al.	und andere
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
evtl.	eventuell
F	Funktionserfüllung
F&E	Forschung und Entwicklung
FDA	Food and Drug Administration
FG	Funktionalitätsgrad
GF	Gewichtungsfaktor
ggf.	gegebenenfalls
GP	Grundprinzip
h	Stunde
HoT	House of Technology
i. d. R.	in der Regel
inkl.	inklusive
IPP	Integrierte Produktpolitik
ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnik
ITA	Innovations- und Technikanalyse
K	Kompatibilität
Kap.	Kapitel
KEA	Kumulierter Energieaufwand
kg	Kilogramm
KG	Korrelationsgrad

km	Kilometer
kW	Kilowatt
L	Lösungsprinzip
LCA	Lebenszyklusanalyse (englisch: Life Cycle Assessment)
LCC	Lebenszykluskosten (englisch: Life Cycle Costing)
LR	Referenzlösungsprinzip
m	Meter
MEF	Materialbezogener Energieverbrauch im Funktionselement
MEP	Materialbezogener Energieverbrauch im Produkt
MEPS	Materialbezogener Energieverbrauch im Produktsystem
MI	Material-Input
MIPS	Materialinput pro Serviceeinheit
MIT	Materialintensität
MJ	Megajoule
MMF	Materialbezogene Materialverbrauch im Funktionselement
MMP	Materialbezogener Materialverbrauch im Produkt
MMPS	Materialbezogener Materialverbrauch im Produktsystem
Mrd.	Milliarden
NGO	Nichtregierungsorganisation
OLED	Organische Leuchtdiode (englisch: organic light emitting diode)
P	Leistung
PA	Produktfolgenabschätzung
PEF	Prozessbezogener Energieverbrauch im Funktionselement
PEP	Prozessbezogener Energieverbrauch im Produkt
PEPS	Prozessbezogener Energieverbrauch im Produktsystem
PIUS	Produktionsintegrierter Umweltschutz
PMF	Prozessbezogener Materialverbrauch im Funktionselement
PMP	Prozessbezogener Materialverbrauch im Produkt
PMPS	Prozessbezogener Materialverbrauch im Produktsystem
Pr	Priorität
PReF	Produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktion
QFD	Quality Function Deployment
RA	Reinigungsanlage
RB	Relevant bei der Abschätzung des Ressourcenbedarfs
RE	Ressourceneffizienz
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
RFID	radio-frequency identification

RoHS	Restriction of Hazardous Substances
RV	Relevant bei der Bewertung des Ressourcenverbrauchs
S.	Seite
SL	Standardlösung
sog.	sogenannte
SS	Schwachstelle
Stk	Stück
t	Tonne
TA	Trocknungsanlage
Tab.	Tabelle
TReF	Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktion
TRIZ	Theorie des erfinderischen Problemlösens
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
UV	Ultraviolettstrahlung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
vgl.	vergleiche
W	Watt
WA	Selbstbedienungswaschanlage
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
WFI	Water for injection
Z	Zielstellung
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

1 Einleitung

1.1 Einführung

Menschliches Leben und wirtschaftliche Aktivitäten beruhen seit jeher auf der **Nutzung von Ressourcen**. In den letzten Jahrzehnten hat aber der stetig wachsende Bedarf an natürlichen Ressourcen, wie bestimmte Metallrohstoffe, seitens der Industrieländer und in zunehmendem Maße auch der Entwicklungs- und Schwellenländer neue Formen angenommen. Zum einen verursacht die Wertschöpfung teilweise erhebliche Umweltbelastungen (Faulstich, Leipprand 2009) und zum anderen ist ein Großteil der wichtigen natürlichen Ressourcen wie etwa Erdöl endlich und ungleich auf wenige Länder verteilt. Folgen sind Abhängigkeiten, Marktverzerrungen sowie Lieferengpässe und volatile Preisentwicklungen. Zudem steigt die Gefahr von geopolitischen Konflikten um den begehrten Zugang zu Ressourcen (Bardt 2008). Insbesondere auch in Anbetracht des weltweiten Bevölkerungswachstums und steigender Lebensstandards – Milliarden Menschen in Ländern wie China und Indien stehen vor der Wohlstandsschwelle – ist von einer zunehmenden Verschärfung der Situation auszugehen (Herrmann 2010).

Experten mahnen schon lange die Grenzen des quantitativen Wachstums an und fordern nachhaltige Produktions- und Konsumlösungen, um letztendlich auch künftigen Generationen eine ausreichende Lebensqualität zu sichern (u. a. Meadows 1972). Ein Weg wäre, die vorhandenen Ressourcen verantwortungsvoll und bestmöglich, mithin effizient zu nutzen. Hierdurch könnten Umweltbelastungen verringert und Reserven geschont werden. Auch aus betriebswirtschaftlicher und wettbewerbsstrategischer Perspektive, insbesondere etwa für Anwenderbranchen des Maschinen- und Anlagenbaus, ist das Konzept der **Ressourceneffizienz** interessant (vgl. Kap. 3.1.3.2). Neben unmittelbaren Vorteilen wie Senkung von Energie- und Materialkosten – letztere stellen mit ca. 45 % den mit Abstand größten Kostenblock in der Produktion dar (Statistisches Bundesamt 2010) – ergeben sich auch mittelbar Potenziale durch die Aufdeckung zukünftig bedeutsamer Zukunftsmärkte und Innovationsmotoren (BMBF 2006, Spath 2008, Reuscher et al. 2008). Ressourceneffiziente Innovationen können laut Experten in den kommenden Jahren daher mit erheblichen Wachstumschancen rechnen (vgl. Roland Berger 2007, BMU 2006, Jörissen et al. 2008).

Ressourceneffizienz ist keine konjunkturelle Blase: Das Wissen um die bestehenden Herausforderungen und Chancen verhalf der Ressourceneffizienz, ein wesentliches **wirtschaftspolitisches Ziel** in Deutschland zu werden (vgl. BMBF 2008) und führte zu der Entstehung einer Reihe von Initiativen wie das VDI Zentrum für Ressourceneffizienz oder das Netzwerk Ressourceneffizienz. Außerdem ist „Grünes Wachstum“ für viele national und international produzierende Unternehmen inzwischen die tragfähige Basis einer erfolgreichen zukunftsorientierten Unternehmensstrategie geworden (vgl. Ernst & Young 2010, Bleischwitz et al. 2009, Unruh, Ettenson 2010, Eversheim et al. 2010). Mittlerweile werden seitens anwendender Kunden und anderer Stakeholder solche unternehmerischen Ausrichtungen der Hersteller auch vermehrt wahrgenommen und erwartet (Kreibich 2010, Erhard, Pastewski 2010).

Jedoch limitieren verschiedene **Hemmnisse** in der Industrie, dass ressourceneffiziente Lösungen in der Breite überhaupt nachgefragt werden (vgl. Kap. 3.1.4.3). Ursächlich sind vor allem das Nichtwissen um die konkreten Ansätze und Potenziale sowie die generelle Unsicherheit hinsichtlich neuer technologischer Lösungen (vgl. Faulstich, Leipprand 2009).

Grunddilemma ist dabei die kaum leistbare Darstellbarkeit eines zu erwartenden ganzheitlichen Nutzens.¹

Mit der Entwicklung emergenter Technologien² generiert die Forschung **vielversprechende Lösungen**, die mehr Nutzen bei gleichzeitig geringerem Ressourcenverbrauch versprechen (Day et al. 2000, Rohn et al. 2008).³ Basis solcher Lösungen sind neuartige Ansätze der Technologieentwicklung wie die Energieverbrauchsreduzierung und die Nutzung innovativer Methoden wie etwa die Bionik, die sich biologische Prinzipien aus der Natur zum Vorbild nimmt.⁴

Um diesem Lösungspotenzial eine entsprechende Nachfrage seitens der Industrie gegenüberzustellen, bedarf es einer gezielten **Unterstützungsleistung** (Eversheim et al. 2010). Sie kann insbesondere darin bestehen, die Umsetzung von Ressourceneffizienz mittels emergenter Technologien bei der Entwicklung von Produkten des Maschinen- und Anlagenbaus zu leisten. Hierin wird ein betriebswirtschaftlich lohnender und volkswirtschaftlich effektiver Hebel gesehen, Innovation am Markt zu schaffen.⁵

1.2 Defizite bestehender Verfahren

Eine derartige unternehmerische Entscheidungsunterstützung muss im Wesentlichen mittels geeigneter methodischer Verfahren geleistet werden. Diese sollen Ressourceneffizienzpotenziale aufdecken, neue technologische Lösungsmöglichkeiten entwickeln und bewerten helfen sowie eine Umsetzung in die Anwendung ebnen können. Existierende Verfahren im Zusammenhang dieser Fragestellungen weisen jedoch verschiedene Defizite auf (vgl. Kap. 3.2.5, 3.3.4 und 3.4).

Ein Großteil vorhandener Ansätze der **Umweltwirkungsbewertung** wie die Ökobilanz beschreiben die Umweltwirkungen eines Produktes oder einer Technologie nachsorgend (Schaltegger 2004). Anspruch dieser wissenschaftlichen Verfahren ist, eine möglichst umfassende problemorientierte Analyse sämtlicher Umweltwirkungen des Betrachtungsgegenstandes zu gewährleisten, was ein entsprechend komplexes und zeitintensives Vorgehen erfordert (Oberender 2006). Letztendlich fehlt meist ein geeigneter Praxisbezug, der beispielsweise auch die Berücksichtigung von Kosten und technischer Umsetzbarkeit erlaubt.

Etablierte Methoden der **Technologiebewertung** sind zwar teilweise um Aspekte der Nachhaltigkeit oder Umweltwirkung erweitert worden, betrachten bisher allerdings nicht explizit ressourceneffizienzbezogene Gesichtspunkte, da die hierfür benötigten methodischen Zugänge zur Querschnittsthematik „Ressourceneffizienz“ fehlen. Eine ganzheitliche Bewertung unter integrierter Berücksichtigung funktionaler, ressourceneffizienzbezogener und ökonomischer Aspekte ist somit bisher nicht leistbar. Damit kann auch das Leistungsspektrum emergenter Technologien für die innovative Anwendung in Produkten zur Ressourcenein-

¹ Ganzheitlicher Nutzen wird in dieser Arbeit als eine Vergrößerung des lebenszyklusbezogenen technisch-funktionalen, ressourceneffizienzbezogenen und ökonomischen Wertevorrats oder eine Minderung eines derartigen Werteverlustes verstanden (Kap. 3.1.1). Im engeren Sinne wird damit die Fähigkeit eines Produktes beschrieben, diese Bedürfnisse integrativ zu befriedigen (vgl. Alisch 2004).

² Neuartige und mit einer hohen „Durchschlagskraft“ wirkende Technologien (vgl. Kap. 3.2.1.1).

³ Mittels Nanotechnologie kann etwa aufgrund neuartiger Steuerung physikalischer und chemischer Vorgänge Material gezielter eingesetzt oder die Ausbeute in Verfahrensprozessen erhöht werden (vgl. Steinfeld, von Gleich 2010).

⁴ Die Bionik bietet Ideen aus der Natur und kann die Entwicklung ressourceneffizienter Lösungen unterstützen. Dies hängt mit der Nutzung inhärent naturnaher Prinzipien zusammen, die etwa leichtere und langlebigere Lösungen eröffnen (vgl. Jörisen et al. 2008).

⁵ Vgl. Seliger 2007, Neugebauer et al. 2008, Schippel et al. 2009, Mocker et al. 2010, VDMA, Roland Berger 2009, Eversheim et al. 2010.

sparung nicht optimal genutzt werden (vgl. Reid, Miedzinski 2008, Bullinger 1994, Rohn et al. 2008).

Für einige der klassischen **Produktentwicklungsansätze** existieren um die Umweltdimension erweiterte Betrachtungen, die besonders problematische Abschnitte des Lebenszyklusses berücksichtigen – wie das Recycling (Pahl et al. 2005). Die Nutzungsphase steht bei diesen allerdings bisher nicht im Mittelpunkt, wobei hier häufig die größten Potenziale vorliegen (Schimmelpfeng 1999). Ansätze der umweltorientierten Produktentwicklung wie das Ökodesign integrieren erfolgreich Umweltaspekte in ihrer Komplexität und Breite vorsorgend in den Produktentwicklungsprozess, meist bezogen auf Konsumgüter und nicht auf Investitionsgüter (VDI 2000). Dabei ist bei vielen Ansätzen keine vollständige Unterstützung von der Berücksichtigung bekannter Problemstellungen über die Integration von Technologiepotenzialen bis hin zur Ableitung von Maßnahmen gegeben (Tischner 2001).

Die Diskussion dieser Defizite in Wissenschaft und Praxis mündet in der Erkenntnis, dass es eines neuen Verfahrensansatzes bedarf, um *Unternehmen bei der Verbesserung der Ressourceneffizienz ihrer Produkte zu unterstützen*.

2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

2.1 Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und Evaluierung eines Verfahrens zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung auf Basis einer Technologiepotenzialbetrachtung. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht dabei die Identifikation und Bewertung alternativer ressourceneffizienzsteigernder Lösungen aus dem Bereich der emergenten Technologien. Davon ausgehend und unter Berücksichtigung der in Kap. 1.2 genannten Defizite werden folgende Teilziele verfolgt:

- Das Verfahren soll Unternehmen befähigen, auf Basis vorhandener Erfahrungen **nutzungsphasenbezogene Ressourcenverbrauchspotenziale** eines Produktes systematisch zu identifizieren und zu analysieren.
- Auf deren Grundlage sind anschließend problemlösungsorientiert ressourceneffizienzsteigernde **alternative Lösungsprinzipien von emergenten Technologien** zu ermitteln. Dies soll auf der Basis formalisierter ressourceneffizienzbezogener Optimierungsansätze und technologischer Potenzialdarstellungen als systematischer Zugang zur Ressourceneffizienz möglich werden.
- Identifizierte Lösungsprinzipien müssen nun nach deren Eignung für die Nutzenerweiterung im Produkt nach **funktionalen, ressourceneffizienzbezogenen und ökonomischen Anforderungen ganzheitlich bewertet** werden. Hierfür gilt es, einen Ansatz mit praxisorientierten Methoden zu entwickeln, der einschlägige Parameter effizient und effektiv identifizieren und bewerten hilft.
- Um letztendlich eine organisatorische und methodische Verankerung in der unternehmerischen Planungsfunktion zu gewährleisten, muss das **Verfahren anschlussfähig sein**, und daher konform üblicher Produktentwicklungsprozesse konzipiert werden. Darüber hinaus sollen die Aufgabenstellungen des Technologiemanagements wie die Identifikation und Auswahl von Technologien und die kreative Generierung von Ideen im Sinne des Innovationsmanagements unterstützt werden.

Die Anwendbarkeit des Verfahrens wird am **Beispiel von zwei Industrieunternehmen** erprobt werden. Hierfür werden Unternehmen aus dem Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus ausgewählt, die aufgrund ihrer Unternehmensstrategie als innovative Technologieführer einen hohen Nutzen durch die Umsetzung von Ressourceneffizienzpotenzialen in Produkten erwarten lassen.

2.2 Aufbau und Kapitel

Der Aufbau der Arbeit ist in Abb. 1 dargestellt. Das 3. Kap. vermittelt zunächst die wesentlichen Grundlagen zum Stand des Wissens. In Kap. 3.1 wird die Ressourceneffizienz als unternehmerische Herausforderung diskutiert. Hierbei werden nach der Definition grundlegender Begriffe und der Aufgabenstellung Aspekte eines verantwortungsbewussten Umgangs mit Ressourcen, die unternehmerische Bedeutung dessen sowie die typischen Umsetzungsmöglichkeiten von Ressourceneffizienz vorgestellt. Das Kap. schließt mit der Problemstellung der Arbeit. Anschließend werden im Kap. 3.2 wesentliche Aspekte einer ressourceneffizienzorientierten Technologiebewertung beleuchtet, welche relevante Ansätze und Methoden eines ganzheitlichen Technologiemanagements sowie nutzen- und ressourceneffizienzbezogene Bewertungsmethoden umfassen. Den dritten Schwerpunkt zum Stand des Wissens stellen in Kap. 3.3 die ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklungsansätze dar. Neben Grundlagen des technischen Produktverständnisses und der ressourceneffizienzorientierten Produktentwicklung werden bestehende Ansätze der Produktweiterentwicklung beschrieben.

Kap. 3 schließt mit einer Zusammenfassung von Defiziten und Anforderungen bestehender Ansätze (Kap. 3.4).

Aus den im 3. Kap. vorgestellten Zusammenhängen ergibt sich der Bedarf nach einer methodischen Unterstützung bei der ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung. Daher dient das Kap. 4 der Konzeption eines Verfahrens hierzu. Da dieses auf einem ressourceneffizienzbezogenen Technologiepotenzialmodell beruhen soll, wird ein solches zunächst entwickelt (Kap. 4.1). Nachfolgend werden im Kap. 4.2 die Grundlagen und in Kap. 4.3 die Anforderungen des Verfahrens erläutert.

Kap. 5 beschreibt die Entwicklung des Verfahrens, wobei dessen einzelne Phasen erläutert werden. Diese sind in Kap. 5.1 „Phase I: Definition der Zielstellungen“, im Kap. 5.2 „Phase II: Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme“, im Kap. 5.3 „Phase III: Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen“, im Kap. 5.4 „Phase IV: Lösungen auswählen“ und abschließend im Kap. 5.5 „Phase V: Planung der Maßnahmen“.

Die Tauglichkeit des Verfahrens im praktischen Umfeld wird in der Umsetzung des Verfahrens (Kap. 6) demonstriert. Hier werden zwei Anwendungsbeispiele beschrieben. Nach der Evaluation und Diskussion in Kap. 7 werden in Kap. 8 abschließend eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

Kap. 1	Einleitung			
Kap. 2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit			
Kap. 3	Stand des Wissens			
	Ressourceneffizienz als Herausforderung für Unternehmen	Ressourceneffizienzorientierte Technologiebewertung	Ressourceneffizienzorientierte Produktweiterentwicklung	
Kap. 4	Konzeption eines Verfahrens			
	Ressourceneffizienzbezogenes Technologiepotenzialmodell	Grundlagen des Verfahrens	Anforderungen an das Verfahren	
Kap. 5	Entwicklung des Verfahrens			
	Phase 1: Definition der Zielstellungen	Phase 2: Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme	Phase 3: Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen	Phase 4: Ganzheitliche Bewertung der Lösungen
Kap. 6	Umsetzung des Verfahrens			
	Anwendung des Verfahrens am Beispiel eines Herstellers von Anlagen im Bereich Verpackungstechnik	Anwendung des Verfahrens am Beispiel eines Herstellers von Anlagen im Bereich Fahrzeugwäsche		
Kap. 7	Evaluation und Diskussion			
Kap. 8	Zusammenfassung und Ausblick			

Abb. 1: Aufbau des Verfahrens

3 Stand des Wissens

3.1 Ressourceneffizienz als Herausforderung für Unternehmen

3.1.1 Grundlegende Begriffe und Aufgabenstellung

Produzierende Unternehmen sind stets aufgefordert Innovationen zu entwickeln, um auch zukünftig am Markt bestehen zu können (Spath et al. 2001, Bullinger 2008). Dabei ist es unerlässlich, frühzeitig auf die bestimmenden Entwicklungen und Trends zu reagieren. Insbesondere die gegenwärtigen **Herausforderungen**, die eng mit einer effizienten Nutzung (natürlicher) Ressourcen verknüpft sind, gewinnen für Unternehmen weltweit zunehmend an Bedeutung und erfordern als Antwort, ressourceneffiziente Lösungen bereitzustellen (seitens Hersteller) und einzusetzen (seitens Anwender) (Berns et al. 2009, Westkämper 1999, Tahir, Darton 2010, Seliger 2007, Dispan 2011).

Innovationen bezeichnen grundsätzlich eine Neuerung, können sich auf verschiedene Kontexte wie Produkte, Prozesse und Dienstleistungen beziehen und sowohl technischer als auch organisatorischer Natur sein. Nach HAUSCHILDT spricht man von einer **Innovation**, wenn eine qualitativ neuartige Lösung geschaffen wurde, die auf dem Markt bzw. im betrieblichen Einsatz erfolgreich ist (Schumpeter 1964, Hauschildt 2004). Ist der Neuigkeitsgrad eher gering und tritt die Innovation in Verbindung mit einem bekannten Produkt auf, spricht man auch von inkrementeller Innovation in Abgrenzung zu der radikalen Variante⁶ (vgl. Specht, Möhrle 2002). Soll bei einer Innovation insbesondere ökologischen Anforderungen entsprochen werden, wird auch von Eco-Innovation (Öko-Innovation) gesprochen. Diese wird als „neuartiges, wettbewerbsfähiges Produkt zur Befriedigung menschlicher Bedürfnisse und zur Erhöhung der Lebensqualität unter Nutzung minimalen Verbrauchs von Ressourcen über den vollständigen Lebenszyklus pro Output-Einheit⁷ und unter minimaler Emission toxischer Substanzen“ definiert (Reid, Miedzinski 2008). Darüber hinaus existieren unschärfere Auffassungen, die unter Eco-Innovation einzig die Erweiterung des Innovationsgedankens um ökologische Aspekte verstehen. Gemein ist allen die erstrebte Unterstützung der nachhaltigen Entwicklung durch eine Verringerung der Umweltauswirkungen und eine verantwortungsvolle Nutzung der natürlichen Ressourcen (vgl. Europäische Kommission 2006, Herrmann 2010).

Der Begriff **Ressource** wird je nach Fachdisziplin unterschiedlich aufgefasst. Das unternehmerische Verständnis stellte PENROSE in der „Theory of the growth of a firm“ dar, wonach Ressourcen zur Schaffung und Erhaltung von Wettbewerbsvorteilen von essentieller Bedeutung sind (vgl. Penrose 1995, Untiedt 2009). Hierzu zählen Finanzmittel, Kompetenzen und sonstige Faktoren des Erfolges. Letztere umfassen auch natürliche Ressourcen (vgl. Abb. 2). Zu natürlichen Ressourcen gehören nach der Definition der EUROPÄISCHEN KOMMISSION biotische und abiotische Rohstoffe⁸ wie Biomasse, mineralische Erze, fossile Energieträger aber auch Umweltmedien, strömende Medien sowie der physische Raum und die biologische Vielfalt (Europäische Kommission 2005).

⁶ Eine radikale Innovation stellt eine vollkommen neuartige Lösung dar, die auch gänzlich andere tiefgreifende Folgen sowie Systemanpassungen nach sich zieht (Hauschildt 2004).

⁷ Output-Einheit meint die Einheit erbrachten Nutzens, der aus der Eco-Innovation resultiert.

⁸ Häufig werden die Begriffe „Rohstoffe“ und „Ressourcen“ uneinheitlich, teilweise auch synonym verwendet. In dieser Arbeit wird der etwas weiter gefasste Begriff der „Ressourcen“ verwendet, der die Rohstoffe entsprechend Abb. 2 mit einschließt.

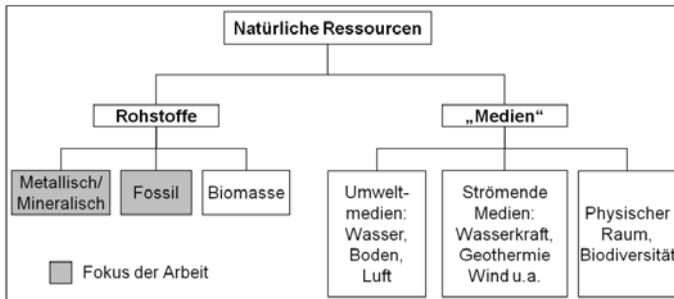


Abb. 2: Klassifikation der natürlichen Ressourcen im weiteren Sinn (Jörissen et al. 2008)

In dieser Arbeit werden unter Ressourcen im engeren Sinn wirtschaftlich bedeutsame Güter verstanden, speziell die Bestandteile der natürlichen Umwelt, die für Produkte benötigt werden (vgl. Schütz, Bringezu 2008). Für produzierende Unternehmen eignet sich folgende Einteilung (vgl. z. B. Eversheim et al. 2010, Jörissen et al. 2008):

- **Energie:** Energie wird bereitgestellt aus fossilen und regenerativen Energieträgern sowie Biomasse für die energetische Nutzung. In dieser Arbeit wird unter Energie als Ressourcenkategorie der Bedarf eines Produktes an elektrischer Energie oder Wärmeenergie verstanden, welcher als ökonomisch relevanter Verbrauch des entsprechenden abiotischen Materials ausgedrückt werden kann (vgl. Ritthoff et al. 2002, Kap. 5.4.2.2).
- **Material:** Material wird bereitgestellt aus mineralischen Rohstoffen sowie fossilen und regenerativen Rohstoffen (abiotischen und biotischen). In dieser Arbeit wird unter Material als Ressourcenkategorie die aus Rohstoffen wie Erze und Erden gewonnenen und im Produktleben benötigten Stoffe verstanden. Hierzu gehören auch stoffliche Betriebs- und Hilfsmittel wie Schmierstoffe.⁹
- **Wasser:** Wasser wird für die industrielle Nutzung aus Süßwasser-Reservoirs bereitgestellt. Hierzu gehören insbesondere solche Medien, die von einem Produkt im stofflichen Sinne benötigt werden wie etwa Prozess- oder Frischwasser. Eingesetzt wird Wasser u.a. als Reinigungsmittel, Kühlmittel oder als Reaktionsmittel.¹⁰

Bei diesem Verständnis handelt es sich um eine input-orientierte sowie speziell für die Nutzung in Produkten ausgerichtete Interpretation des Ressourcen-Begriffs. Andere Kategorien natürlicher Ressourcen wie die strömenden Medien (vgl. Abb. 2) sind von untergeordneter Relevanz für produzierende Unternehmen, da mit der Nutzung kaum abbildbare Kosten verknüpft werden können. Eine Konsolidierung auf die relevanten Ressourcenkategorien Energie, Material und Wasser ist zwecks einer Handhabbarkeit des Begriffs Ressourcen für diese Arbeit grundlegend notwendig.

⁹ Werkzeuge wie Filter oder Pumpen werden als Betriebs- und Hilfsmittel hier jedoch nicht der Ressourcen-Kategorie *Material* zugordnet (vgl. Eversheim et al. 2010).

¹⁰ Die Frage der industriellen Wassernutzungseffizienz hat zumindest in Deutschland derzeit noch keine hohe Priorität. In Ländern, wo Wasser ein knapperes Gut ist, wird dem Thema hingegen eine größere Bedeutung zugemessen. Experten sind sich einig, dass das Sparen von Wasser im globalen Kontext eine zunehmend wichtige Strategie auch im Produktionsumfeld darstellen wird (Mappus, Fussler 2005). Da die in dieser Arbeit betrachteten Produkte (vgl. Kap. 3.3.1) meist eine hohe Exportrelevanz aufweisen, wird in den entsprechenden Industriesektoren der Wassernutzungseffizienz auch hierzulande zunehmend Beachtung geschenkt werden müssen (vgl. Eversheim et al. 2010, BMBF 2008).

Im Zusammenhang mit der Ressourcennutzung haben sich in den letzten Jahren sowohl die Ingenieurwissenschaften als auch die Betriebswirtschaft verstärkt mit der Anforderung **Effizienz** auseinandergesetzt. Die Betriebswirtschaft beherzigt seit jeher das ökonomische Prinzip, welches den Grundsatz beschreibt, dass ein bestimmter Erfolg mit dem geringstmöglichen Mitteleinsatz (Minimalprinzip) bzw. mit einem bestimmten Mitteleinsatz der größtmögliche Erfolg (Maximalprinzip) erzielt werden soll (Wöhe, Döring 2002). Die sich durchsetzende Erkenntnis, dass eine rein auf ökonomische Effizienz ausgerichtete Sichtweise nicht ausreicht, hat bei ganzheitlicheren Betrachtungen inzwischen die Hinzunahme der ökologischen Dimension etabliert (vgl. Kap. 3.2.2). Damit eng verbunden ist der Begriff der Öko-Effizienz. Dieses Verständnis ist auch als relative Kenngröße aus dem Verhältnis der Wertschöpfung als gewünschte zu der Schadschöpfung¹¹ als unerwünschte Größe darstellbar (vgl. Europäische Kommission 2005, Schaltegger, Sturm 1990).

Ressourceneffizienz beschreibt denjenigen Teilaspekt der Öko-Effizienz, der sich auf die Ressourcenbetrachtung konzentriert.¹² Sie lässt sich als die Effizienz definieren, mit der Energie, Material und Wasser in der Wirtschaft genutzt werden, wobei das Ziel ist, einen größeren Mehrwert im Sinne eines nutzenbringenden Outputs je Einheit Ressourceninput zu schaffen (vgl. Europäische Kommission 2005). Dieser Zusammenhang lässt sich auch als Quotient aus Nutzenoutput und Ressourceninput verdeutlichen (vgl. Formel 1).

$$\text{Ressourceneffizienz} = \frac{\text{Nutzenoutput}}{\text{Ressourceninput}}$$

Formel 1: Definition Ressourceneffizienz (in Anlehnung an WBCSD 2000)

Eine effizientere Ressourcennutzung basiert auf dem Streben, die gleiche Leistung bzw. den gleichen Nutzen mit weniger Ressourcenverbrauch zu erbringen. Dies kann sowohl durch die Anwendung von Strategien geschehen, die den Ressourceninput verringern als auch durch solche, die den Nutzenoutput erhöhen. Voraussetzung für eine gesteigerte Ressourceneffizienz ist dabei die Vermeidung des Konterkarierens durch eine negative Beeinflussung der jeweils anderen Größe. So sollte etwa der Strategie einer längeren Produktlebensdauer nicht durch einen unverhältnismäßig hohen Einsatz von Ressourcen zur Instandhaltung entgegengewirkt werden. Ein konsequentes Anwenden dieser Input-orientierten Maxime führt gleichzeitig zu einer weitgehenden Vermeidung von unerwünschten Outputs wie Emissionen (Schmidt-Bleek 1998).¹³

In einem weiter gefassten Verständnis stellt das **Konzept der Ressourceneffizienz** ein marktkonformes Instrumentarium zur Realisierung von Anforderungen aus Nachhaltigkeit, Umwelt- und Klimaschutz und damit Eco-Innovation dar. Im Besonderen ist damit der Anspruch an eine möglichst optimale Nutzung natürlicher Ressourcen in Produktlösungen verbunden. Als strategische Ausrichtung betrachtet, ergänzt Ressourceneffizienz die beiden strategischen Maßgaben eines unternehmerischen Gutes nach Funktionalität und Ökonomie (vgl. Ruud, Larsen 2003). Sie kann somit als zusätzlich bedeutsame Dimension verstanden werden, die weitere – über technisch-funktionale und ökonomische Fragestellungen hinausgehende – Aspekte wie etwa nachhaltige Zukunftsgerechtigkeit abbildet (vgl. Kap. 3.1.3.2).¹⁴

¹¹ Unter Schadschöpfung wird die resultierende negative Umweltwirkung verstanden, die mit Emissionen verbunden sind.

¹² Der in diesem Zusammenhang ebenfalls häufig genutzte Begriff der Rohstoffproduktivität wird in der Literatur meist eher volkswirtschaftlich als Quotient aus Wertschöpfung und Rohstoffverbrauch verstanden (Behrendt, Erdmann 2010).

¹³ Dahinter verbirgt sich die Annahme, dass jede vermiedene Input-Einheit auch eine unerwünschte Output-Einheit vermeidet (vgl. Ritthoff et al. 2002).

¹⁴ Weitere durch Ressourceneffizienz ermöglichte Nutzenfacetten werden in Kap. 3.1.3.2 erläutert.

Bei der unternehmerischen Umsetzung von Ressourceneffizienz spielen neben Ansätzen wie Mitarbeiterqualifizierung oder eine veränderungsbereite Unternehmenskultur vor allem **Technologien** eine zentrale Rolle (vgl. Kap. 3.1.2.2).¹⁵ Sie finden Anwendung bei der Lösung technischer Probleme unter Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher, organisatorischer, sozialer, politischer und gesellschaftlicher Zusammenhänge (Bullinger 1994). In dieser Arbeit werden Technologien als anwendungsbezogene und dennoch allgemeingültige Aussagen über naturwissenschaftlich-technische Ziel-Mittel-Relationen betrachtet (Bullinger 1994). Technologie ist die Wissenschaft von der Technik, wobei letztere wiederum als das materielle Ergebnis von Technologie verstanden werden kann (Ropohl 1979). Von strategisch besonderer Bedeutung sind sogenannte emergente Technologien, die aufgrund ihrer Neuigkeit und besonderen Eingriffstiefe ein hohes Maß an zukunftsorientiertem Management erfordern (vgl. Kap. 3.1.4.2).

In dieser Arbeit sind vor allem deren inhärente Potenziale für den effizienten Einsatz von Ressourcen von Interesse (vgl. Kap. 3.1.4.2 und 3.2.1.1). Inwiefern dieses Potenzial in der Industrie inzwischen erkannt wird, zeigen aktuelle Umfragen: Beispielsweise messen über 60 % der produzierenden Unternehmen bei der Entwicklung von Produkten mittels neuer Technologien der Ressourceneffizienz hohe Priorität zu (vgl. Abb. 3). Zunehmend gilt es, nicht nur vergleichsweise einfach umzusetzende Lösungen nach dem Stand der Technik anzuwenden, sondern auch vermehrt den Einsatz neuer technologischer Lösungen aus Forschungsaktivitäten zu adaptieren, um neue Wege gehen zu können. Idealerweise können hierdurch größere bzw. weiterreichende Effizienzpotenziale gehoben werden (Lang-Koetz et al. 2010). Nun sind Technologieanwender meist an nachweislich nutzenstiftenden Lösungen und nicht an Forschungsergebnissen interessiert (Wallentowitz et al. 2009). Die Veranschaulichung der Bedeutung einer Technologie ist Gegenstand der Technologiebewertung. Um daraus die unternehmerisch richtigen Entscheidungen ableiten zu können, ist die integrierte lebenszyklusbezogene Betrachtung technisch-funktionaler, ressourceneffizienzbezogener und ökonomischer Aspekte – **ganzheitliche Bewertung** – unerlässlich (vgl. Kap. 3.2.2).

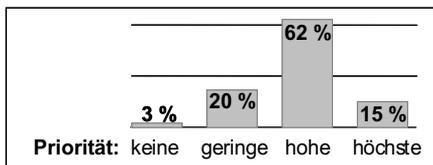


Abb. 3: Priorität der Ressourceneffizienz bei der Entwicklung eines Produkts mittels neuer Technologien gegenüber anderen Strategien (z. B. Funktionalität) im produzierenden Gewerbe [%] (Erhard, Paszewski 2010)

Technologien werden von Unternehmen in Form von Lösungen wie Produkten und Dienstleistungen verwertet. **Produkte** können grundsätzlich als das Ergebnis der Anwendung von bestimmten Technologien zur Erfüllung bestimmter Funktionen oder zum Lösen bestimmter Probleme verstanden werden (Hinterhuber 1982).

Produkte des Maschinen- und Anlagenbaus zeichnen sich häufig durch eine große Anwendungsbreite und -dichte sowie hohe Komplexität und Langlebigkeit aus. Hier ergeben sich für Hersteller besonders lohnende Ansatzpunkte, Ressourceneinsparpotenziale aufzudecken, die im Vergleich zu Prozessinnovationen (z. B. neue Fertigungsprozesse) auch leichter beim Anwender umsetzbar sind (vgl. Seliger 2007). Zudem werden diese Produktlösungen von

¹⁵ Sonstige Strategien zur Umsetzung von Ressourceneffizienz, etwa alternative Nutzungsformen wie Sharing und Leasing sowie Maßnahmen zur Änderung des Verhaltens von Nutzern, werden in dieser Arbeit nicht betrachtet, wobei hier die zumindest volkswirtschaftlich größeren „Hebel“ zur Realisierung von Ressourceneffizienzpotenzialen bestehen (vgl. Bierter 2001).

den Kunden (Maschinenbetreiber) auch aus ökonomischen Gründen zunehmend stärker eingefordert (VDMA, Roland Berger 2009; Erhard, Pastewski 2010). Auch können laut mehrerer Studien effiziente Produkte mit einem stark wachsenden Weltmarktvolumen rechnen (vgl. z. B. Roland Berger 2007).

In dieser Arbeit werden als Produkte speziell Investitionsgüter¹⁶ betrachtet, die als Betriebsmittel im Produktionsumfeld direkt oder indirekt daran beteiligt sind, die Arbeitsaufgabe auszuführen.

Der Prozess der Integration von neuen technologischen Lösungen (Lösungsprinzipien) in Produkten erfolgt in der Produktentwicklung. Da in der Praxis häufig bereits vorhandene Produkte abgeändert werden, ist speziell mit der Produktweiterentwicklung ein zentraler Ansatzpunkt im Lebenszyklus zur Verwirklichung von Eco-Innovationen vorhanden (vgl. Abb. 4 und Kap. 3.3.2).



Abb. 4: Lebenszyklusbezogene Betrachtung bei der ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung

Dabei gilt es, zur Vermeidung von Problemverschiebungen bei der Entwicklung den kompletten technischen **Lebenszyklus** zu berücksichtigen, von der Phase der Rohstoffgewinnung und Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung bzw. dem End-of-life des Produktes (vgl. Kap. 3.3.2.2).¹⁷ Hinsichtlich der potenziellen Auswirkungen neu integrierter Lösungen ist sowohl für den Markterfolg als auch für den Ressourcenverbrauch eines Produktes die besonders relevante Lebenszyklusphase die der Nutzung. Hier bestimmt sich letztendlich der erreichte Nutzen für den Anwender (vgl. Oberender 2006).

Zusammenführend ist als **Aufgabenstellung** festzuhalten, dass sich Hersteller und Anwender aufgrund des Erfordernisses einer effizienten Ressourcennutzung enormen Herausforderungen gegenüber gestellt sehen und daher Unterstützung benötigen (vgl. Kap. 3.1.5). Diese muss insbesondere darin bestehen, mögliche Ressourceneffizienzpotenziale von Technologien abschätzen (vgl. Kap. 3.2) und in bestehende Produkte umsetzen zu können (vgl. Kap. 3.3).

3.1.2 Der verantwortungsbewusste Umgang mit Ressourcen

Globale Zusammenhänge bestimmen maßgeblich unseren Umgang mit den auf der Erde vorhandenen natürlichen Ressourcen. Für ein verantwortungsbewusstes Handeln spielt dabei insbesondere die produzierende Industrie eine zentrale Rolle, weshalb diese auch zu-

¹⁶ Ein von einem Hersteller geschaffenes Investitionsgut ist ein langlebiges ökonomisches Gut – etwa Anlage, Maschine oder sonstiges Gerät, das von Unternehmen (Anwendern) zur Erstellung und Weiterverarbeitung von Gütern angeschafft wird, ohne direkt oder indirekt selbst in die produzierten Güter einzugehen (vgl. Alisch 2004).

¹⁷ Der Lebenszyklusgedanke wird vielfach auch als „Wiege zur Bahre- bzw. „Wiege zur Wiege“-Ansatz bezeichnet, welcher für ein radikales Umdenken in dem Gestalten von Produkten steht (McDonough, Braungart 2002).

nehmend in die gesellschaftliche Nachhaltigkeitsdebatte¹⁸ einbezogen und in die Pflicht genommen wird.

3.1.2.1 Zusammenhänge der globalen Rohstoffnutzung

Natürliche Ressourcen sind die Basis globaler Wertschöpfungsketten, angefangen bei der Rohstoffgewinnung über die industrielle Produktion bis zu den Endprodukten und damit aller wirtschaftlichen Aktivitäten zur Erfüllung menschlicher Bedürfnisse.

Die über die vergangenen Jahrzehnte etablierten Produktionssysteme sind als ausgesprochen ressourcenintensiv zu bezeichnen (Bierter 2001). So entfielen im Jahre 2007 96,3 % von der Gesamtmenge des benötigten Primärmaterials in Deutschland in Höhe von 1.254 Mio. t auf die industrielle Produktion (Statistisches Bundesamt 2010). Die **Entwicklungen** der jüngeren Vergangenheit deuten allerdings auf eine zunehmend effizientere Rohstoffnutzung in Deutschland hin. Diese ist jedoch vor allem auf eine Hinwendung zu weniger rohstoff- und energieintensiven Branchen zurückzuführen und nicht auf einen tatsächlichen Produktivitätsanstieg durch die sparsame Verwendung von Rohstoffen (vgl. BMU 2007).¹⁹ Eine Reihe von Untersuchungen zeigen vorhandene Potenziale auf (vgl. auch Kap. 3.1.3.2), so eine der Internationalen Energieagentur, nach der der Energieaufwand der meisten industriellen Prozesse um mindestens 50 % höher ist als das durch die Gesetze der Thermodynamik ermittelte theoretische Minimum (IEA 2006). Soll das Ziel der Bundesregierung, die Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 2006 zu verdoppeln, erreicht werden, müssten diese Potenziale konsequent ausgeschöpft und damit letztendlich beachtliche Effizienzfortschritte geleistet werden (vgl. Behrendt, Erdmann 2010).

Einen maßgeblichen Einfluss auf die Produktivität der Rohstoffnutzung haben die **Rohstoffmärkte**, die in der Vergangenheit durch starke Instabilitäten und fluktuierende Rohstoffpreise gekennzeichnet waren, welche wiederum ihre Ursache in einem Ungleichgewicht von Angebot und Nachfrage hatten (Angerer et al. 2009). So sind die Preise stark von Wirtschaftszyklen und sonstigen globalen Krisen und Aufschwungphasen abhängig, womit die große Schwierigkeit einer Prognose von Preisentwicklungen verbunden ist (Rosenau-Tornow et al. 2009). Die jüngst teilweise stark steigenden Rohstoffpreise hingen hauptsächlich mit dem Nachfragezuwachs aufstrebender Volkswirtschaften wie beispielsweise der chinesischen Volkswirtschaft zusammen (HWWI 2008). Grundsätzlich ist trotz möglicher Preiseinbrüche, wie es die jüngste Rezession demonstrierte, mittelfristig eher von weiteren Preissteigerungen für Rohstoffe auszugehen, da Nutzungsrivalitäten anhalten werden (Faulstich, Leipprand 2009). Hohe Nachfragezuwächse waren insbesondere bei Rohöl, Steinkohle, Stahl, Aluminium oder Kupfer zu verzeichnen (vgl. Lukas et al. 2007). Noch schneller als die Nachfrage nach solchen Massenrohstoffen wächst der Bedarf nach speziellen Rohstoffen²⁰, die vor allem für emergente Technologien und somit zukünftigen Anwendungen wie etwa OLED benötigt werden (vgl. hierzu Tab. 30 im Kap. 10.1.1 des Anhangs), so dass hier Lieferengpässe in Zukunft wahrscheinlicher werden (Behrendt, Erdmann 2010).

¹⁸ „Nachhaltige Entwicklung“ wird nach dem Brundtland-Report wie folgt definiert: „Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs“. Die in der Folge begonnene Debatte beschäftigte sich mit der Frage der intra- und intergenerationellen Gerechtigkeit (WCED 1987). Im allgemeinen Verständnis setzt sich der Begriff der Nachhaltigkeit aus den drei Komponenten der Ökonomie, Ökologie und der sozialen Nachhaltigkeit zusammen.

¹⁹ Die Rohstoffproduktivität des verarbeitenden Gewerbes erhöhte sich zwischen 1994 und 2007 um 36,1 % (Behrendt, Erdmann 2010).

²⁰ Dabei handelt es sich insbesondere um Chrom, Kobalt, Titan, Zinn, Antimon, Niob, Tantal, Platin, Palladium, Ruthenium, Rhodium, Osmium, Iridium, Silber, Neodym, Scandium, Yttrium, Selen, Indium, Germanium und Gallium (Behrendt, Erdmann 2010).

Man kann die **Rohstoffversorgung** insgesamt als ein vulnerables System auffassen, welches vielfältigen wirtschafts- und machtpolitischen Einflüssen und Interessen ausgesetzt ist. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass das Vorkommen eines Großteils der Rohstoffe ungleich verteilt (z. T. auch in politisch instabilen Regionen), begrenzt und nicht erneuerbar ist. Insbesondere an einem rohstoffarmen²¹ Standort wie Deutschland ist dies prekär, da bestimmte Rohstoffe im Unterschied zu anderen Produktionsfaktoren wie die menschliche Arbeitsleistung kurzfristig nicht substituierbar sind – wie im Fall der Erdölabhängigkeit der chemischen Industrie (Hirth et al. 2007). Dies führt zu einer nahezu vollständigen Importabhängigkeit bei Metallrohstoffen und vielen Industriemineralien hierzulande und stellt somit einen Risikofaktor dar (Faulstich, Leipprand 2009). Eine Ableitung von spezifischen Handlungsstrategien etwa für Unternehmen ist schwierig, da prognostizierte Entwicklungen von Knappheiten und realen Preisen bei Rohstoffen häufig kaum belastbar sind (vgl. Behrendt, Erdmann 2010).

Prognosen über Verfügbarkeiten und Reichweiten einzelner Rohstoffe fallen unterschiedlich aus. Erdöl, welches noch die Hauptquelle der heutigen Energiegewinnung darstellt, wird laut Hochrechnung noch etwa 40 Jahre reichen; Kupfer wird es wahrscheinlich noch ca. 36 Jahre geben und Blei 20 Jahre (Bardt 2008, BGR 2010).²² **Langfristig** sind sowohl Faktoren vorstellbar, die zu einer Minderung des aktuellen Problemdrucks beitragen (etwa eine lang andauernde Rezession der Weltwirtschaft oder die Entdeckung neuer Rohstoffvorkommen) als auch Faktoren, die zu einer weiteren Verschärfung der Situation führen (Angerer et al. 2009).²³ Eine wahrscheinliche Verschärfung ist durch die sog. Megatrends zu erwarten (vgl. Jörissen et al. 2008). So wird von einem weltweiten Wachstum der Weltwirtschaft um jährlich drei Prozent bis 2030 und einer Bevölkerungszahl von neun Milliarden Menschen im Jahr 2050 ausgegangen (BMU 2007), womit auch die wachsende Nachfrage nach Produkten verbunden ist (Seliger 2007).

Eine Nutzung der Ressourcen für die Wertschöpfung und Sicherung von Wohlstand ist unumgänglich. Die **Folgen einer nicht nachhaltigen Ressourcennutzung** sind inzwischen weitgehend offenkundig und äußern sich etwa in Pänomenen wie Klimawandel, Verknappung des Süßwasserdargebots oder dem ungezügelten Verbrauch knapper Rohstoffe (vgl. WBGU 1999). Ziel auf europäischer politischer Ebene ist daher die Entkopplung des Ressourcenverbrauchs von einer wachsenden Wirtschaft (Europäische Kommission 2005).²⁴ In Deutschland ist die Ressourceneffizienz auch ein zentraler Bestandteil der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie.

Aufgrund dieser Zusammenhänge ist der verantwortungsbewusste Umgang mit den natürlichen Ressourcen eine der **zentralen Herausforderungen der Gegenwart**, wobei die notwendigen Veränderungsprozesse insbesondere in der Wirtschaft stattfinden müssen (Herrmann 2010).

3.1.2.2 Beitrag zur Ressourceneffizienz seitens Unternehmen

Strategische Ansätze, die diese unterstützen sollen, werden seit einigen Jahren diskutiert und finden Ausdruck in unterschiedlichen Begriffen des ökologischen Wirtschaftens wie

²¹ Dies bezieht sich auf die begrenzten Vorkommen an Primärrohstoffen. Sekundärrohstoffe sind als Abfall durchaus vorhanden, aber aufgrund einer unvollständigen Kreislaufwirtschaft nicht nutzbar.

²² Die Versorgungsrisiken von Rohstoffen werden u. a. durch das Institut der deutschen Wirtschaft bewertet (Tab. 41 im Kap. 10.3.2 des Anhangs).

²³ Im Falle von bestimmten Indikatoren bzw. Trends wie bzgl. Rohstoffreserven sind Aussagen grundsätzlich mit großen Unsicherheiten verknüpft (Rosenau-Tornow et al. 2009).

²⁴ Schon vor über drei Jahrzehnten wurde mit dem Buch von MEADOWS über die Grenzen des Wachstums (Meadows et al. 1972) der Zusammenhang zwischen Industrieproduktion, Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung beschrieben.

„Dematerialisierung“, „Faktor 4“, „Kreislaufwirtschaft“ und „Industrial Ecology“ (vgl. von Weizsäcker et al. 1997).²⁵ Zielsetzung ist meist die integrierte Berücksichtigung der ökonomischen, sozialen und umweltbezogenen Nachhaltigkeitsaspekte oder auch Triple Bottom Line nach ELKINGTON (Elkington 1998). Grundsätzlich sind in der Umsetzung drei **Basistrategien** zu unterscheiden (BUND 2008):

- *Konsistenz* („anders“): regenerative Energien, geschlossene Kreisläufe etc.
- *Effizienz* („besser“): höherer Wirkungsgrad, höhere Ausbeute etc.
- *Suffizienz* („weniger“): geringerer Konsum, „qualitatives Wachstum“ etc.

Ressourceneinsparpotenziale lassen sich mit allen drei Strategien erzielen. In der Literatur werden in diesem Zusammenhang meist alternative Technologielösungen in der Wertschöpfung von Produkten und Dienstleistungen (Effizienz) und gezielte Veränderung von Verhaltensmustern bei Verbrauch und Nachfrage (Suffizienz) diskutiert (vgl. Faulstich, Leipprand 2009). Aber auch gänzlich neue Lösungen (Konsistenz) können erhebliche Beiträge zur Senkung des Ressourcenverbrauchs leisten. Als Eco-Innovation haben solche Lösungen das Potenzial, das Ausmaß der Umweltnutzung zu möglichst geringen Kosten zu verringern (Reid, Miedzinski 2008, BMU 2009a). Technologien können mit ihren Anwendungen, u. a. aufgrund der direkteren Beeinflussbarkeit solcher Potenziale, insbesondere für die Konsistenz- und Effizienzstrategie, einen essentiellen Beitrag leisten (vgl. Neugebauer et al. 2008).

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf technologieinduzierten Effizienz- und Konsistenzstrategien zur Ausschöpfung der immensen Potenziale von Produkten zur Erhöhung der Effizienz in der Wertschöpfung (Mocker et al. 2010). Diese lassen sich im Vergleich zu Verhaltensänderungen leichter adressieren, steuern und quantifizieren.

Für eine Umsetzung des Konzepts Ressourceneffizienz spielen insbesondere Innovationsfortschritte eine wesentliche Rolle (Behrendt, Erdmann 2010). Diesen **Hebel** können technologieentwickelnde und –anwendende produzierende Unternehmen als Hersteller und Anwender steuern, wobei insbesondere dem Maschinen- und Anlagenbau als Ausrüster mit Investitionsgütern eine Schlüsselrolle zukommt (Dispan 2011, VDMA, Roland Berger 2009, Neugebauer et al. 2008, Behrendt, Erdmann 2010). Dessen Anlagen bestimmen etwa bei der Herstellung von Konsumgütern wiederum deren lebenszyklusweiten Ressourcenverbrauch.

Eine **Umsetzung** der Ressourceneffizienz kann allerdings aus unternehmerischer Sicht nur dann sinnvoll sein, wenn die Maßgaben des Marktes eingehalten werden und Wettbewerbsvorteile (vgl. Kap. 3.1.3.2) verschafft werden (Mahammadzadeh 2006). Daher ist die Thematik „Umweltschutz“ meist nur ein Teilziel einer komplexen Zielhierarchie im Unternehmen und dem Ziel „Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit“ untergeordnet.

3.1.3 Bedeutung der Ressourceneffizienz für Unternehmen

Der verantwortungsbewusste Umgang mit Ressourcen ist einerseits mit zunehmenden Anforderungen verbunden, eröffnet aber andererseits auch Chancen und Nutzenpotenziale.

3.1.3.1 Anforderungen an die unternehmerische Ressourcennutzung

Aufgrund der beschriebenen Schlüsselrolle des verantwortungsbewussten Umgangs mit Ressourcen sehen sich Unternehmen zunehmend mit **neuen Anforderungen** seitens Inte-

²⁵ „Dematerialisierung“ bedeutet, die durch menschliches Handeln verursachten Stoffströme auf die Input-Seite der Volkswirtschaft drastisch zu reduzieren. „Faktor 4“ bezeichnet die geforderte Effizienzsteigerung, die eine Verdopplung des verteilbaren Wohlstands bei gleichzeitiger Halbierung des Naturverbrauchs ermöglicht. „Industrial Ecology“ hat das Wirtschaften nach dem Vorbild von Ökosystemen zum Ziel, d. h., kreislauforientiert, ressourceneffizient, nachhaltig und zukunftsfähig (von Weizsäcker et al. 1997).

ressengruppen konfrontiert, die sich in Begriffen wie Corporate Social Responsibility (CSR)²⁶ manifestierten. Während in der Vergangenheit politisch-rechtliche Faktoren, wie vor allem die Umweltgesetzgebung als wesentliche Triebkraft für die Umweltschutzorientierung galten, wird der Umweltschutz heute in hohem Maße durch Marktteilnehmer aufgrund der marktbezogenen Forderungen nach effizienten Produkten und Prozessen veranlasst (Mahammadzadeh 2006, Herrmann 2010, Eversheim et al. 2010).²⁷ Weiterhin zeichnet sich seitens Unternehmen der Trend einer weitreichenden Verantwortungsübernahme für gesellschaftliches Handeln ab, die über die ISO 26000 auch in normierter Form nachweisbar ist (vgl. DIN 2009a).²⁸

In den letzten Jahrzehnten sind eine Reihe von **internationalen²⁹ und nationalen³⁰ politischen Rahmenprogrammen** zur Förderung von Prinzipien der Nachhaltigkeit und des Umwelt- und Klimaschutzes implementiert worden. Dies gilt speziell für die Ressourceneffizienz von Produkten aufgrund veränderter politischer Einstellungen und vermehrter globaler Verpflichtungen (vgl. VDMA, Roland Berger 2009). Da allerdings eine umfassende Ressourcenpolitik bisher nicht vorhanden ist (Faulstich, Leipprand 2009), sehen sich Unternehmen teilweise mit einer Reihe unterschiedlicher existierender Instrumente, Ansätze und auch politischer Fördermöglichkeiten konfrontiert, deren konkrete Bedeutungen häufig schwer abzuschätzen sind. Wesentliche Ansätze zur Förderung eines Innovationswettbewerbs bei Herstellern sind die Instrumente der Produktverantwortung sowie produktbezogene Regelungen.

Zu den beabsichtigten Effekten der **Produktverantwortung** zählen die Reduzierung des Stoffeinsatzes und der Abfallströme, bessere Recyclingfähigkeit und Reparaturfähigkeit von Produkten, längere Nutzungsdauer und alternative Geschäftsmodelle wie Leasing (vgl. Jörissen et al. 2008).³¹ Im Mittelpunkt stehen dabei die Verknüpfung von Herstellung und Entsorgung eines Produktes und eine entsprechende Verantwortungsübernahme. In der Praxis reduziert sich die Produktverantwortung der Unternehmen meist auf die Kostenverantwortung für die umweltgerechte Abfallentsorgung und -verwertung. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass zunehmend rechtliche Anforderungen zur lebenszyklusweiten Ressourcennutzung mit entsprechender Nachweispflicht für Produkte (vgl. Kap. 3.3.2.2) entwickelt werden und Anwendung finden (Lenzen et al. 2007).

Der europäische Ansatz der integrierten Produktpolitik (IPP) verfolgt das Ziel, das Umweltverhalten von Produkten entlang des gesamten Lebensweges zu verbessern. Die von der Kommission (Europäische Kommission 2001) vorgeschlagenen Instrumente sind etwa Nor-

²⁶ CSR umschreibt den freiwilligen Beitrag der Wirtschaft zu einer nachhaltigen Entwicklung, die über die gesetzlichen Forderungen hinausgeht. Damit steht CSR für verantwortliches unternehmerisches Handeln in der eigentlichen Geschäftstätigkeit, über ökologisch relevante Aspekte bis hin zu den Beziehungen mit Mitarbeitern und dem Austausch mit den relevanten Anspruchs- bzw. Interessengruppen (Europäische Kommission 2001).

²⁷ Zukünftige Umweltpolitik wird auch verstärkt die Nutzung von marktwirtschaftlichen Instrumenten, die etwa den Preis (z. B. Steuern) oder Schadstoffmengen (Emissionshandel²⁷) beeinflussen, integrieren (Faulstich, Leipprand 2009).

²⁸ Die ISO 26000 ist ein Leitfaden, der Orientierung und Empfehlungen gibt, wie sich Unternehmen verhalten sollten, damit sie als gesellschaftlich verantwortlich angesehen werden können. Der Leitfaden wurde im November 2010 veröffentlicht und seine Anwendung ist freiwillig.

²⁹ Speziell in Japan und der Europäischen Union, aber auch zunehmend in der USA.

³⁰ Das BMU hat jüngst im Oktober den Entwurf eines nationalen Ressourceneffizienzprogramms vorgelegt.

³¹ Grundsätzlich zu vermeidende Folgen nicht wahrgenommener Verantwortung sind gesellschaftliche und umweltbezogene Risiken, die sich aus der Komplexität und Dynamik der betroffenen technischen Systeme ergeben (vgl. Herrmann 2010). Genannt seien hierzu auch die Darstellungen von MEADOS ET AL. zu den vier „Denkfallen“ exponentielles Wachstum: Verzögerte Rückkopplung, overshoot, selektive Wahrnehmung und Rebound-Effekt (vgl. Kap. 3.2.1.3), die dazu führen, dass Systemreaktionen auf anthropogenen Input nur schwer vorherzusehen sind (Meadows et al. 2004).

mung, Richtlinien für Produkt-Design, Umweltkennzeichnung und Lebenszyklusanalyse (vgl. Kap. 3.2.3.2). So ist etwa die Ökodesign-Richtlinie³² der nächste Schritt nach – WEEE³³ und RoHS³⁴ für eine umweltfreundliche Gestaltung von energieverbrauchsrelevanten Produkten. Deren Geltungsbereich wird kontinuierlich um neue Produktgruppen, auch für den gewerblichen Bereich, erweitert (Faulstich, Leipprand 2009). Eine aktuell durchgeführte Studie prüft die Anforderungen an Werkzeugmaschinen. Tendenziell ist bei diesen Regelwerken von einer zunehmenden Berücksichtigung auch von Investitionsgütern auszugehen, da hier ein großer Handlungsbedarf gesehen wird (VDMA, Roland Berger 2009). Diskussionen werden hierüber aktuell insbesondere auch unter der Prämisse des Erhalts der globalen Wettbewerbsfähigkeit in entsprechenden Fachgremien geführt. Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe sonstiger, meist branchenspezifischer **Regelwerke** wie die REACH³⁵-Richtlinie der Chemischen Industrie, die Richtlinien der amerikanischen Food and Drug Administration sowie technische Maßgaben wie Good Manufacturing Practice (GMP) oder Stand der Technik (SdT) (vgl. VHK 2005). Die für den Maschinen- und Anlagenbau maßgeblichen Regelwerke (z.B. vom VDMA) hängen stark von der Art des Produktes ab und können etwa einzelne Komponenten wie Antriebe oder bestimmte Betriebsstoffe wie Reinigungslösungen betreffen.

Bisherige Maßnahmen konzentrieren sich damit insgesamt meist auf die Prävention von Umweltwirkungen, die Erhöhung der Recyclingfähigkeit und auf Energieeffizienz. Die Weiterentwicklung unter Berücksichtigung der Materialeffizienz für eine umfassendere Ressourcenbetrachtung wird inzwischen von der Fachwelt zunehmend gefordert (Kristof 2007).

Gerade für exportorientierte Unternehmen des deutschen Produktionssektors wird die Ressourceneffizienz also in den kommenden Jahrzehnten auch als wichtiger Differenzierungsfaktor weiter ins Zentrum der Aufmerksamkeit rücken (VDMA, Roland Berger 2009, Neugebauer et al. 2008). Deren nachhaltiger Erfolg ist von besonderer Bedeutung für den Wirtschaftsstandort Deutschland – etwa 87 % aller deutschen Exporte entstammen dem produzierenden Gewerbe (Nyhuis et al. 2008). Dies führt zu einem **wachsenden Handlungsdruck** für Unternehmen, auf diese Anforderungen frühzeitig zu reagieren (vgl. VDMA, Roland Berger 2009).

3.1.3.2 Chancen und Nutzen einer effizienten Ressourcennutzung

Gerade der deutschen produzierenden Industrie kann die konsequente Berücksichtigung des Konzepts der Ressourceneffizienz auch enorme Chancen eröffnen. Hierzulande existieren optimale **Voraussetzungen**, die weltweite Kompetenzführerschaft in den Bereichen ressourceneffizienter Verfahren und Produkte noch auszubauen und damit strategische Wettbewerbsvorteile zu sichern (VDMA, Roland Berger 2009, Eversheim et al. 2010).

Zukunftsmärkte werden sich an der Nachhaltigkeit orientieren müssen (vgl. Tahir, Darton 2010); nach LOVINS wird die sechste Welle der Innovation bzw. der sechste Kondratieffzyklus im Wesentlichen auf ressourceneffizienten Technologien basieren, da diese einen idealen Nährboden für Eco-Innovation bieten (vgl. Lovins 2008, Reuscher et al. 2008, Reid, Miedzinski 2008). In Deutschland hat diese Erkenntnis mit der Orientierung der Hightech-Strategie und speziell auf Ressourceneffizienz ausgerichteten Forschungspro-

³² Dies bezeichnet die Richtlinie „Ecodesign Requirements for Energy-Related Products“ (Europäisches Parlament und Europäischer Rat 2009), mit der ein produktpolitisches Instrument existiert, das u.a. den Lebenszyklusgedanken und verschiedene ökologische Kriterien berücksichtigt. Die vorhergehende Richtlinie wurde in Deutschland als Energiebetriebene-Produkte-Gesetz – EBPG im Jahr 2008 in Kraft gesetzt.

³³ Die WEEE-Richtlinie (Waste from Electrical and Electronic Equipment) der Europäischen Union behandelt die Wiederaufbereitung, Sortierung und Verarbeitung von Elektro- und Elektronikgeräten.

³⁴ Die RoHS-Richtlinie (Restriction of certain Hazardous Substances) regelt die Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten.

³⁵ Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals.

grammen³⁶ auch einen entsprechend deutlichen Niederschlag in der Forschungspolitik gefunden (BMBF 2006). Die Rohstoffversorgung als Standortfrage beschäftigt auch die Europäische Kommission in einer Rohstoffinitiative – national befassen sich die Bundesregierung und der BDI mit einer umfassenden Rohstoffstrategie. Beiden geht es zunächst darum, den Zugriff auf Rohstoffvorkommen zu sichern und Handelshemmnisse abzubauen (Behrendt, Erdmann 2010).

Schon heute stellen ressourceneffiziente Lösungen in einigen Bereichen bereits ein wichtiges Standbein dar. Bereits 2005 hatten Leitmärkte für Umwelttechnologie wie Energieerzeugung oder Kreislaufwirtschaft zusammen ein Gesamtvolumen von 1000 Mrd. Euro (Roland Berger 2007). Für den Markt der Rohstoff- und Materialeffizienz werden laut Roland Berger Strategy Consultants acht Prozent jährliches Wachstum erwartet (Roland Berger 2007).

Für produzierende Unternehmen speziell die Anwenderbranchen des Maschinen- und Anlagenbaus sind vor allem folgende prinzipielle **Chancen** mit der effizienten Nutzung von Ressourcen verbunden:

- *Kostensenkung*: Die Senkung des Ressourcenverbrauchs kann strategische Kosteneinsparpotenziale beim Einkauf von Ressourcen ermöglichen, gerade in einem Umfeld steigender Rohstoffpreise. Dies wird durch eine Reihe unterschiedlicher Projekte zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der industriellen Praxis bestätigt (Eversheim et al. 2010).³⁷
- *Versorgungssicherheit*: Ressourceneffizienz ist ein potentes Mittel, um der zunehmenden Ressourcenverknappung (die zu steigenden bzw. stark fluktuierenden Preisen führt) und Versorgungsunsicherheit bei manchen seltenen Rohstoffen (z. B. bestimmte Metalle und Erden) zu begegnen (Angerer et al. 2009).
- *Wettbewerbsvorteile*: Das Halten bzw. Ausbauen der nationalen und globalen Marktposition kann durch erzielte ressourceneffizienzinduzierte Technologievorsprünge bzw. Eco-Innovationen unterstützt werden (vgl. Spath 2008, VDMA, Roland Berger 2009). Dabei können etwa mit der entsprechenden Ausrichtung eines Produktes die Strategien der Kostenführerschaft (z. B. Materialreduktion), Differenzierung (z. B. höhere Qualität) und Fokussierung (z. B. energieeffiziente Gestaltung) unterstützt werden (Wallentowitz et al. 2009).
- *Imageverbesserung*: Die Verbesserung des Images und die Erweiterung der Werbemöglichkeiten mit ressourceneffizienter Performanz ergänzen konventionelle Werbestrategien und erzeugen ein modernes Bild im Sinne einer CSR (vgl. Kap. 3.1.3.1) und kann damit auch ein besseres Ranking bei Nachhaltigkeitsindizes, wie dem DJSI³⁸ an Kapitalmärkten begünstigen (vgl. Schaltegger, Burritt 2000).
- *Nachhaltige Zukunftsgerechtigkeit*: Eine Steigerung der Ressourceneffizienz unterstützt bei der Erfüllung der aus globalen Zusammenhängen (Kap. 3.1.2.1) erwachsenden Anforderungen (vgl. Kap. 3.1.3.1) wie Umweltgerechtigkeit oder die Minde-

³⁶ Beispiele sind das Fona-Programm (Forschung für die Nachhaltigkeit) des BMBF und das Forschungsprogramm „ressourceneffiziente Produktion“.

³⁷ Beispielsweise zeigen die Beratungsprojekte der Deutschen Materialeffizienzagentur (demea), wie in der Regel etwa 1% bis 2,5% der Kosten durch eine verbesserte Materialeffizienz eingespart werden kann (Behrendt, Erdmann 2010). Die Untersuchung „Energieeffizienz in der Produktion“ (Neugebauer et al. 2008) ergab ein potenzielles Energieeinsparpotenzial im produzierenden Gewerbe von ca. 210 Petajoule pro Jahr. Nach dem Statistischen Bundesamt machen Materialkosten ca. 46 % der Kosten im produzierenden Gewerbe aus (Statistisches Bundesamt 2009).

³⁸ Die Dow Jones Sustainability Indexes (DJSI) sind eine Familie von Aktienindizes, welche neben ökonomischen auch ökologische und soziale Kriterien berücksichtigen. Damit heben sich die DJSI sowohl von klassischen Aktienindizes, als auch von rein ökologieorientierten Indizes ab.

rung von klimarelevanten Emissionen.³⁹ Zukünftige Märkte werden diese von Marktteilnehmern noch stärker einfordern, als dies bisher der Fall gewesen ist (vgl. Kreibich 2010).

Damit werden alle fünf von PORTER identifizierten Kräfte⁴⁰ des unternehmerischen Wettbewerbs tangiert (vgl. Porter 1999). Unternehmen verzeichnen i.d.R. kein Wachstum, wenn es ihnen nicht gelingt, die Qualität der Produkte zu verbessern oder eine andere Differenzierung gegenüber dem Wettbewerber zu erzielen (vgl. Herrmann 2010).

Wollen herstellende Unternehmen auf dem Markt erfolgreiche ressourceneffiziente Produkte anbieten – die von deren Kunden (Anwender) im gewünschten Umfang nachgefragt werden – gilt es, die Erfolgskriterien von Herstellern und Anwendern zu kennen und zu bedienen. Abb. 5 zeigt beide **Perspektiven** bzgl. der allgemeinen Erfolgskriterien und jener, die durch eine ressourceneffizienzorientierte Ausrichtung des Produktes typischer Weise positiv beeinflusst werden können. Insbesondere auf Seiten des Anwenders ist eine Vielzahl dieser Kriterien durch die Umsetzung von Ressourceneffizienz beeinflussbar.

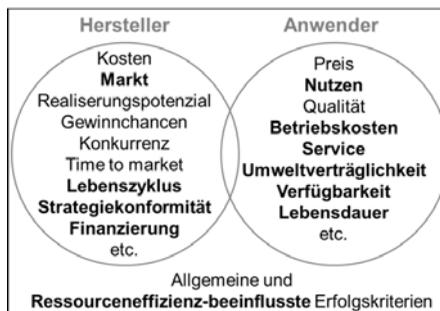


Abb. 5: Allgemeine und beispielhafte Ressourceneffizienz-beeinflusste Erfolgskriterien für Produkte (Schäppi et al. 2005, angepasst)

Nur wenn es dem Hersteller gelingt, die beiden Perspektiven zusammenzubringen und die jeweiligen Ansprüche in dem Produkt konsequent zu berücksichtigen, können die genannten Chancen realisiert werden. Dies ist auch deshalb sinnvoll, da Aufwand und Gewinn bei der Erschließung von Chancen häufig zeitlich und akteursbezogen auseinanderfallen und daher differenziert betrachtet werden müssen (vgl. Kap. 3.1.4.3).

Aus den geschilderten Konstellationen wird ersichtlich, dass die Triebkraft für den effizienteren Ressourceneinsatz in Unternehmen in erster Linie die durch eine gezielte Erfüllung von Erfolgskriterien ermöglichte Auslösung von **Wachstumsimpulsen** ist. Dafür ist die synergetische Kooperation zwischen Wertschöpfungspartnern notwendig (Rohn et al. 2010).

3.1.4 Umsetzung von Ressourceneffizienz in Unternehmen

Die in der unternehmerischen Praxis typischer Weise verfolgten prinzipiellen **Angriffspunkte** zur Steigerung der Ressourceneffizienz sind folgende (vgl. BMBF 2010):

³⁹ Nach einer Studie im Auftrag des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) könnte allein der deutsche Maschinen- und Anlagenbau durch den verstärkten Einsatz von innovativen Verfahren und Methoden in zehn Jahren zu einer Verminderung der CO₂-Emissionen von 198 Millionen Tonnen beitragen (VDMA, Roland Berger 2009).

⁴⁰ Diese sind Bedrohung durch neue Marktteilnehmer, die Verhandlungsmacht von Zulieferern, die Verhandlungsmacht von Abnehmern, der Einfluss von alternativen Produkten und der Konkurrenzdruck von vorhandenen Wettbewerbern im Markt (Porter 1999).

- Produktionsprozesse optimieren (z. B. Stoff- und Energiestrommanagement, Remanufacturing)
- innovative Technologien einsetzen oder entwickeln
- Produktdesign ausrichten (z. B. Umweltorientierte Produktentwicklung)
- Qualität sichern und Risiken minimieren (z. B. Planungs- und Kostenrechnungssysteme)
- Recyclingpotenziale erschließen
- Arbeitsprozesse und Produktionsabläufe verbessern
- relevantes Know-how durch Mitarbeiterqualifizierung aufbauen
- Produkt-Dienstleistungs-Systeme anwenden

Es wird ersichtlich, dass sich vielfältige Möglichkeiten in sämtlichen Wertschöpfungsphasen finden lassen (vgl. Eversheim et al. 2010). Dabei haben jene in der Produktentwicklung eher präventiven, die der Produktion eher aktiven und die der Entsorgung eher reaktiven Charakter. Wesentlich ist die Antizipation von passender Technologie, deren Identifikation, Bewertung und Implementierung sich aber etwa aufgrund des allgemein beschleunigten technologischen Wandels (vgl. Tschirky, Koruna 1998) mitunter als anspruchsvoll erweist, weshalb eine organisatorische Unterstützung benötigt wird.

Die Umsetzung der Ressourceneffizienz hat grundsätzlich sowohl eine handlungsorientierte als auch eine technische **Facette**. Aus handlungsorientierter Perspektive sind insbesondere spezielle betriebliche Instrumente und Managementmethoden von Bedeutung.⁴¹ Aus technischer Perspektive steht neben den Produktionsprozessen häufig das Produkt selbst im Mittelpunkt (vgl. Seliger 2007, VDMA, Roland Berger 2009). Dem gegenüber stehen jedoch auch typische Hemmnisse im Unternehmen, die häufig eine derartige Umsetzung verhindern.

3.1.4.1 Handlungsorientierte Ansätze für Ressourceneffizienz

Aufgaben des Managements umfassen das Entwerfen und Festlegen von Ordnungsmustern mittels Bausteinen wie Managementsystemen und -methoden (Herrmann 2010). Die strategische Zielsetzung der Minimierung von negativen Umweltwirkungen wird in vielen Unternehmen seit einigen Jahren durch die **systematische Planung, Steuerung und Kontrolle der betrieblichen umweltrelevanten Aktivitäten** umgesetzt (Eckhardt 2007). Hierbei unterstützen Umweltmanagementsysteme nach ISO 14001⁴² und EMAS⁴³. Darüber hinaus existieren eine Reihe praxisnaher Ansätze wie der Produktionsintegrierte Umweltschutz (PIUS), der dazu dient, Produktionsprozesse effizienter zu gestalten. Dabei lassen sich Maßnahmen und Instrumente nach ihrer retrospektivischen (ex post) oder prospektivischen (ex ante) Ausrichtung unterscheiden. Die prospektivische bietet mehr Potenzial für eine lebenszyklusweite Effizienzsteigerung aufgrund der stärker vorsorgenden und gestalterischen Orientierung.

⁴¹ Sonstige organisatorische Maßnahmen wie die Entwicklung von Betreibermodellen oder Leasing-Konzepten werden hier nicht thematisiert.

⁴² Das übergeordnete Ziel der ISO 14001 ist es, den Umweltschutz und die Verhütung von Umweltbelastungen im Einklang mit sozioökonomischen Erfordernissen zu fördern. Die Forderungen, die an ein Umweltmanagementsystem gestellt werden, sind bei Unternehmen jeder Art und Größe anwendbar (Eckhardt 2007, DIN 1997).

⁴³ EMAS steht abkürzend für „Eco Management and Audit Scheme“ und wird im Deutschen oft als „Öko-Audit“ bezeichnet. EMAS ist ein Umwelt-Management-System, das sich mit der langfristigen und systematischen Erfassung, Kontrolle und Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes beschäftigt (Eckhardt 2007).

Zur Unterstützung der erwähnten Ansätze oder auch nur zum Management ressourcenbezogener Informationen und Daten können verschiedene etablierter Managementmethoden⁴⁴ des betrieblichen Umweltschutzes beitragen. Eine Übersicht findet sich in Tab. 31 des Kap. 10.1.2 im Anhang. **Gängige Methoden** zur detaillierten Ermittlung und Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen stellen häufig Anpassungen bewährter Managementmethoden dar, um Informationen für die strategische und operative Planung in wirtschaftlichen Größenbegriffen bereitzustellen. Die Öko-Effizienz-Analyse der BASF etwa wurde speziell für Umweltanforderungen entwickelt. In der unternehmerischen Praxis werden meist Standardsoftware wie Tabellenkalkulationsprogramme, Checklisten, aber auch spezielle IT-Lösungen (vgl. Tab. 32 in Kap. 10.1.2 des Anhangs), verwendet (vgl. Eckhardt 2007, Lang-Koetz 2006). Darüber hinaus können auch gängige Methoden der Technologiebewertung und Produktentwicklung eine Form der Umweltwirkungsbewertung leisten (vgl. Kap. 3.2.3 und 3.3.3).

3.1.4.2 Technische Ansätze für Ressourceneffizienz

Ein Großteil der heutigen Umweltprobleme wird direkt oder indirekt durch Technik verursacht. Gleichzeitig beinhalten Technologien das Potenzial zu ihrer Bewältigung (vgl. Coenen, Grunwald 2003). Aus Sicht der Ingenieurwissenschaften bieten Technologien nach BULLINGER Kenntnisse und Fertigkeiten zur **Lösung technischer Probleme** (Bullinger 1994). Dabei kann deren Anwendung sowohl in Produktionsprozessen und Produkten als auch in Dienstleistungen stattfinden (Jörissen et al. 2008). Abb. 6 zeigt beispielhaft die mögliche Bandbreite, in der Umwelttechnologien additiv oder integrativ eingesetzt werden können (Reid, Miedzinski 2008).

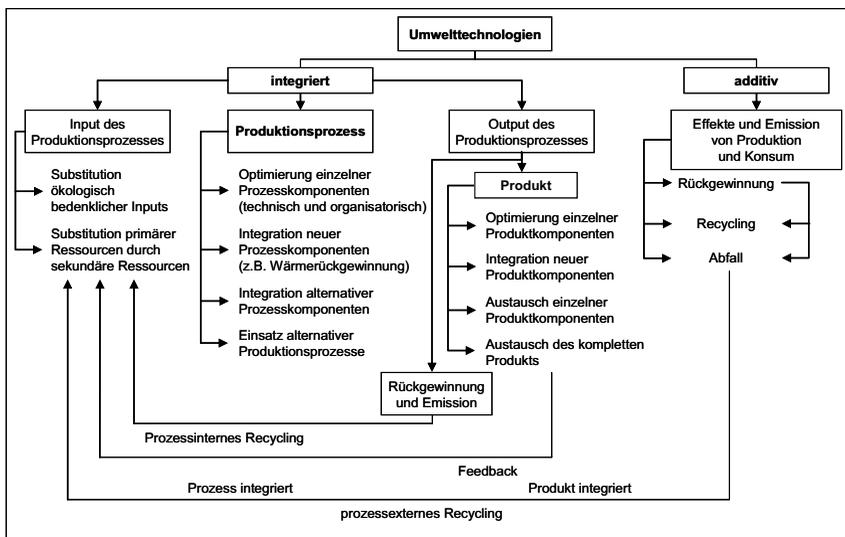


Abb. 6: Einsatzmöglichkeiten von Umwelttechnologien (übersetzt aus Reid, Miedzinski 2008)

Dabei ist für Unternehmen insbesondere die Differenzierung über die Produktleistung wettbewerbsstrategisch interessant (Wallentowitz et al. 2009). So werden laut einer Studie des

⁴⁴ Unter Managementmethoden wird die hier konkretisierte, auf die Lösung spezifischer Probleme ausgerichtete Operationalisierung von Managementsystemen bzw. sonstigen Managementaufgaben verstanden (Herrmann 2010).

VDMA etwa Energieeffizienzsteigerungen in den anwendenden Branchen des Maschinen- und Anlagenbaus zukünftig speziell durch die an der Produktion beteiligten **Produkte** (Investitionsgüter) erzielt (VDMA, Roland Berger 2009). Hierfür seien demnach je zur Hälfte bestehende Technologien und neue Technologien einzusetzen (VDMA, Roland Berger 2009). Zu deren Integration als passende Lösungen (im Sinne der Erzielung eines ganzheitlichen Nutzens) müssen unterstützende Methoden eingesetzt werden wie die im Kap. 3.1.4.1 vorgestellten. Diese sind allerdings in der Regel nicht für die Integration emergenter Technologien ausgelegt.

Im bestehenden Produkt lassen sich je nach Anwendungskontext und Lebenszyklus vielfältige **Ansätze** zur Umsetzung von Ressourceneffizienz finden (vgl. Kap. 4.1.1).⁴⁵ Diese sind in nahezu allen Branchen relevant (Rohn et al. 2008). Im Falle eines hohen Stoffdurchsatzes können grundsätzliche Einsparpotenziale, etwa durch eine Verringerung des Ressourceneinsatzes bei gleichzeitiger Wahrung des gewünschten Outputs, erzielt werden. Weiterhin können Rohstoffe mit begrenzter Reichweite durch Rohstoffe mit größerer Reichweite, nachwachsende Rohstoffe oder durch Sekundärmaterialien substituiert werden. Besonders wertvolle Stoffe oder solche, die Schäden für Mensch und Umwelt hervorrufen können, aber nicht substituierbar sind, können beispielsweise in geschlossenen Kreisläufen geführt werden. Bei bestimmten Produktgruppen, die sich etwa durch eine besondere Komplexität⁴⁶ oder Wertigkeit auszeichnen, kann die Strategie der Lebensdauerverlängerung sinnvoll sein (Jörissen et al. 2008). Große Effizienzpotenziale liegen auch in dem optimalen Zusammenwirken mehrerer Produkte, das durch Anpassungen der Steuerung und der Prozesse erzielt werden kann (vgl. VDMA, Roland Berger 2009). Diese Ansätze werden meist im Rahmen der Produktentwicklung (vgl. Kap. 3.3.2) initiiert und zeichnen sich durch die unterschiedlichen potenziellen Innovationsgrade entsprechender Lösungen aus. So erfordern die Umsetzungen von neuen Lösungen im Bereich des Prozesses und der Materialien häufig tiefgreifendere Eingriffe als die anderen Ansätze. Gleichzeitig sind aber meist größere Potenziale vorhanden (vgl. Grothe 2006). Generell ist zu beachten, dass diese Ansätze in der konkreten Umsetzung in der Regel neben der technologischen Lösung auch weitere Anpassungen erfordern und deren Realisierung immer unter Berücksichtigung der spezifischen Anwendung zu prüfen ist.

Im Hinblick auf den Grad des Eingriffs in ein Produkt(system)⁴⁷ lassen sich daher verschiedene **Stufen bei der Umsetzung von Ressourceneffizienz** unterscheiden. In der Literatur werden diese Stufen uneinheitlich eingeteilt und benannt. Das Spektrum einer möglichen neuen technologischen Lösung reicht dabei von der Optimierung über inkrementelle Innovationen als Redesign und Konzeptänderung bis zu radikalen System-Innovation (vgl. Abb. 7 VDI 2000, Bierter 2001, Oberender 2006). Die Schwierigkeit der Umsetzung steigt dabei mit dem Innovationsgrad.

⁴⁵ Meist werden die folgenden allgemeinen Ansätze angewendet: Die *Steuerung*, die das Zusammenwirken mehrerer Einzelteile wie Komponenten betrifft; *Konstruktion*, die die Integration bzw. Substitution von Komponenten betrifft; der *Prozess*, der die Änderung des Stoffs- und Energiestroms betrifft oder die *Materialien*, die Qualitätsverbesserungen bzw. den Austausch verbauten Materials betreffen (vgl. VDMA, Roland Berger 2009). Dies ist auch eine im Rahmen der Umweltwirkungsbewertung übliche Betrachtungsweise (Schaltegger, Burritt 2000).

⁴⁶ Die Komplexität kann sich dabei etwa aus dem Aufbau, den verbauten Baugruppen und Materialien oder den Einsatzbedingungen ergeben.

⁴⁷ Unter Produktsystem (auch Produktnutzungssystem genannt) wird hier das Produkt im weiteren Kontext verstanden, mit besonderer Beachtung des realisierbaren Nutzens und zugehöriger Dienstleistung (vgl. Schmidt-Bleek 1997, Bierter 2001). Die Berücksichtigung des ganzen Produktsystems stellt eine vieldiskutierte Maßnahme zur Reduktion von Umweltbelastungen dar (Oberender 2006). So können sich beispielsweise häufig Ressourceneffizienzeffekte aus einem optimierten Zusammenwirken der Produkte untereinander ergeben wie etwa bei mehreren Maschinen in einer Verfahrensstufe (VDMA, Roland Berger 2009).

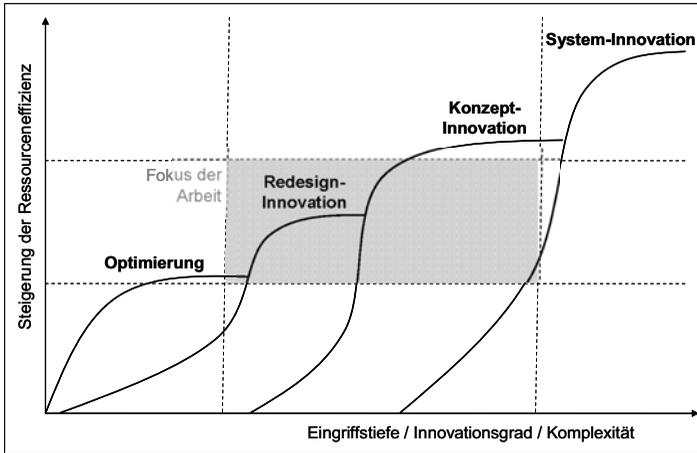


Abb. 7: Vier Stufen möglicher Lösungen zur Umsetzung von Ressourceneffizienz im Produkt (vgl. Bierter 2001, Oberender 2006, Charter et al. 2001)

Optimierung meint dabei etwa den Austausch einer weniger effizienten Komponente durch eine effizientere (z. B. Motoren mit der günstigeren Effizienzklasse IE⁴⁸) oder die Anpassungen der Steuerungstechnik. Ein Redesign hat zum Ziel, den Ressourcenverbrauch durch eine verbesserte Konstruktion zu verringern. Die Konzeptänderung eines Produktes eröffnet in Abgrenzung hierzu deutlich größere Ressourceneffizienzpotenziale, da das Funktions- bzw. Nutzenkonzept neu überdacht wird. Dabei ist auch der erste entscheidende Schritt die sorgfältige Bestimmung der wesentlichen Funktionen, die das neue Produkt erfüllen soll (vgl. Kap. 3.3.1.2). Zielstellungen sind die Verlängerung der Nutzungsdauer und die Erhöhung des vom Produkt geleisteten Nutzens, indem das Produkt etwa „multifunktional“ gestaltet wird (Bierter 2001). System-Innovation bezeichnet vollständig neue Lösungen. Damit kann die komplette Neugestaltung des Produktionsprozesses, in dem das betrachtete Produkt einen Nutzen erfüllt, verbunden sein. Der in dieser Arbeit betrachtete Lösungsraum ist in Abb. 7 dargestellt und berücksichtigt alle vier Stufen, wobei die beiden mittleren den Fokus ausmachen.⁴⁹ Primäre Zielstellung ist dabei der Einsatz eines neuen technologischen Lösungsprinzips für ein bekanntes Bedürfnis (bzw. eine Funktion, vgl. Kap. 3.3.1) im Produkt als Investitionsgut (vgl. Spath, Warschat 2008).

Die aus einer technologieorientierten Sicht möglichen Ansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Nutzungsphase (dem Fokus der Arbeit), wie die Kreislaufführung von Ressourcen sind in Kap. 4.1.1. beschrieben. Zur Adressierung solcher Ansätze bieten **emergente Technologien** Chancen, die insbesondere aufgrund ihres breiten Einsatzfeldes und der guten Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfelder einen ausgeprägten Querschnittscharakter aufweisen (Behrendt, Erdmann 2010, Jochem et al. 2005, Schippl, Jörissen 2010). So sind aus dem Bereich der Nanotechnologie auch einige neuartige ressourceneffiziente Anwendungen in verschiedenen Branchen bereits im Einsatz, z. B. bestimmte Beschichtungs- und Syntheseverfahren und Werkstoffverbesserungen. Der konkrete

⁴⁸ Die Norm DIN EN 60034-30 (DIN 2009b) definiert internationale Wirkungsgradklassen (IE1, IE2 bis IE3) für Niederspannungs-Drehstrom-Asynchronmotoren im Leistungsbereich von 0,75 kW bis 375 kW.

⁴⁹ Dies gilt nur für ein Verständnis der Stufen im *weiteren Sinn* bezogen auf *einzelne alternative Lösungen* des Produktes. Im *engeren Sinn* handelt es sich bei dem Verfahren um die Umsetzung von Ressourceneffizienz bei dem Redesign bzw. bei der Produktweiterentwicklung *eines Produktes* (vgl. Kap. 3.3.2).

ganzheitliche Nutzenvorteil einer solchen Umsetzung zeigt sich allerdings meistens erst in einer detaillierten und umfassenden Analyse (vgl. Kap. 3.2.2). Beispielsweise ist der Preis für einen Nanolack pro Kilogramm meist höher als der für einen herkömmlichen Lack. Da in speziellen Anwendungen jedoch mit einer geringeren Menge Material eine ähnliche oder sogar verbesserte Wirkung erreicht werden kann, können so schließlich in einer späteren Lebenszyklusphase Kostenvorteile realisiert werden (Pastewski et al. 2009).⁵⁰ Tab. 1 zeigt beispielhafte Ressourceneffizienzpotenziale von Nanotechnologien im Überblick.

Tab. 1: Beispielhafte Ressourceneffizienzpotenziale von Nanotechnologien (Bauer et al. 2007)

Nanotechnologien	Beispielprodukte	Ressourceneffizienzpotenziale
Nanoelektronik	Elektronische Bauteile, Bioelektronische Bauteile	Energieeffizienz, schnelle Datenverarbeitung, Ersetzen von Silizium
Nanooptik	Optoelektronische Bauteile	höhere Datenübertragungsraten, Miniaturisierung
Nano-Herstellung	Nano-Strukturen für elektronische Bauteile, hauchdünne Schichten von Werkzeugen und Bauteilen	Energieeffizienz, schnelle Datenverarbeitung, längere Lebensdauer
Nano-Chemie, Nanomaterialien	Nanopartikel (als Teil) von neuen Materialien oder neuen Verbundwerkstoffen	neue mechanische, elektrische, magnetisch aktive, optische Eigenschaften und folglich unbekannte Materialfunktionen, weniger Gewicht und Volumen, Verbesserung der Eigenschaften
Nanobiotechnologie	Bio-basierte Mikroproduktion von elektronischen Bauteilen, Biosensoren, Biokatalysatoren, Motoren auf zellulärer Ebene	medizinisches Frühwarnsystem, Energieeffizienz
Nano-Analytik	Messinstrumente von Quanteneffekten	analysierende Nanostrukturen

In anderen Fällen wie bei Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT) ist die Technologiereife für einzelne Anwendungen derzeit noch nicht ausreichend (vgl. Kap. 3.2.1.2). Hier sind die Potenziale zwar auch abschätzbar, für eine praxistaugliche Anwendung besteht aber weiterhin großer Forschungsbedarf (vgl. Pastewski et al. 2009).

Ein **Überblick** zu weiteren Ressourceneffizienzpotenzialen relevanter emergenter Technologien findet sich in Kap. 4.1.2.

3.1.4.3 Hemmnisse einer effizienten Ressourcennutzung

Die umfassende **Erschließung existierender Ressourceneffizienzpotenziale** schreitet auf unternehmerischer Ebene nur langsam voran (vgl. Berns et al. 2009, Faulstich, Leipprand 2009). Weitestgehend etabliert sind „naheliegende“ Maßnahmen zur Optimierung, etwa innerbetrieblicher Energie- und Stoffströme. Dem gegenüber stehen die gut dokumentierten erzielbaren positiven Effekte und geeigneten Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz.⁵¹ Allerdings sind speziell die vorhandenen Potenziale emergenter Technologien nicht ausreichend aufbereitet, was für die methodisch unterstützte Implementierung neuer Lösun-

⁵⁰ Vgl. Ausführungen zum Life Cycle Costing in Kap. 3.2.3.2.1.

⁵¹ Zu nennen sind eine Vielzahl aktueller Veröffentlichungen etwa von BARON et al. oder ROHN et al. zu Ressourceneffizienzsteigerungspotenzialen, die grundsätzliche Möglichkeiten von neuen Technologie(feldern) beschreiben, allerdings aus eher volkswirtschaftlicher Perspektive (Baron et al. 2005, Rohn et al. 2010). Neben diesen, meist allgemein bleibenden Untersuchungen gibt es auch praxisnahe Untersuchungen, die konkrete Fallbeispiele aufzeigen.

gen etwa in Produkten jedoch notwendig ist. **Gründe**, warum ressourceneffiziente Lösungen von Unternehmen neben dem Fehlen personeller und finanzieller Kapazitäten noch vergleichsweise wenig nachgefragt werden, sind u. a. (vgl. Behrendt, Erdmann 2010, Faulstich, Leipprand 2009, Bleischwitz et al. 2009, Baron et al. 2005, Erhardt, Pastewski 2010):

- *Informations- und Beurteilungsdefizite*, die bei umsetzenden Akteuren (Hersteller und Anwender) aufgrund des bestehenden Nichtwissens um die Grundlagen, Möglichkeiten und Potenziale vorhanden sind (vgl. Erhardt, Pastewski 2010).⁵² Dabei fehlt es an umfassenden und anwendungsbezogenen Betrachtungen zur Umsetzung auf unternehmerischer Ebene (BMBF 2010, Rohn et al. 2008). Insbesondere die für eine Relevanzbeurteilung in der Praxis benötigten Dialogprozesse finden nicht in ausreichendem Maße statt. Hinzu kommt auch das Fehlen einer entsprechenden Methodenkompetenz, da es sich hierbei um komplexe Wissensgebiete handelt (z. B. lebenszyklusorientierte und systemische Ansätze). Diese wird insbesondere benötigt, um relevante Informationen zu emergenten Technologien zu beschaffen, deren Potenzial bedarfsgerecht zu bewerten und diese ggf. zu adaptieren. Hierbei handelt es sich um komplexe technologische Zusammenhänge, deren Entwicklungslinien nur schwer zu analysieren sind (Bullinger 2008, Day et al. 2000).
- *ungünstige Anreizstrukturen*, die es für Akteure nicht ausreichend attraktiv machen, ihren Ressourceneinsatz zu optimieren. Beispiele sind die primäre Ausrichtung auf Kostenminimierung im Einkauf oder der fehlende Bezug zum Materialeinsatz bei Bonussystemen. Der als groß empfundene Aufwand für die Identifikation und Abschätzung der Ressourceneffizienzpotenziale geht häufig mit einer mangelnden Investitionsbereitschaft einher. Erschwerend wirken auch die Komplexität der Darstellung eines konkreten Nutzens aufgrund der z. T. schwer monetarisierbaren Potenziale und unterschiedlichen Nutznießer entlang des Lebenszyklusses sowie die häufig geforderte kurzfristige Amortisierung neuer technologischer Lösungen. Zudem spielt der Anschaffungspreis bei Investitionsentscheidungen meist eine größere Rolle als die Kosten der nachgelagerten Phasen (vgl. Herrmann 2010). Der Hersteller hat in der Regel keine Motivation, einen höheren Aufwand in ein ressourcenschonendes Produkt zu investieren, wenn dies nicht direkt vom Markt honoriert wird (vgl. Brahmher-Lohss et al. 2004). Hinzu kommt, dass entsprechende Leistungsmerkmale entweder vom Kunden vorausgesetzt werden oder nur unter großem Aufwand geprüft werden können (Herrmann 2010).
- *Unsicherheit* ist in vielen Fällen ein Grund, der mit vorhandenen Bedenken zusammenhängt, bestehende Produktionsprozesse zu verändern, einzuführen oder gar radikalere Innovationen umzusetzen. Ein Wechsel hin zu einer neuen Technologie wird von Anwendern häufig mit hohen Kosten verbunden. Hinzu kommt das Verharren in einer „me-too“ Strategie, indem vielfach nur jener Technologie vertraut wird, die von anderen Anwendern ebenfalls eingesetzt wird (vgl. Ruud, Larsen 2003). Darüber hinaus kann auch eine Scheu vor teilweise notwendigen wertschöpfungskettenübergreifenden Kooperationen mit Partnern oder Konkurrenten angenommen werden.

Abhilfe können hier etwa zusätzliche personelle Kapazitäten und **externes Fachwissen** leisten. Hier setzen inzwischen eine Reihe von Verbänden und Beratungsinstitutionen⁵³ oder

⁵² In einer Befragung von ca. 450 Entscheidern und Experten aus Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Industrieverbänden gab nur ein Drittel der Befragten an, über Wissen bzgl. Lösungsansätze zur Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz in den eigenen Produktionsabläufen zu verfügen (vgl. BMBF 2010).

⁵³ Z. B. die Deutsche Materialeffizienzagentur (demea) und die Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

auch Netzwerkaktivitäten⁵⁴ an. Praxisorientierte Untersuchungen zeigen, dass der konsequente Abbau dieser Hemmnisse betriebswirtschaftlich lohnend sein kann (vgl. Kap. 3.1.3.2).

3.1.5 Zusammenfassung und Ableitung der Problemstellung

Der verantwortungsvolle Umgang mit Energie, Material und Wasser, die als Grundstoffe in der industriellen Produktion eingesetzt werden, ist die vielleicht größte globale **Herausforderung** unserer Zeit (vgl. Bleischwitz et al. 2009, Herrmann 2010, Cuhls et al. 2009, Seliger 2007). Neben politischen und wissenschaftlichen Institutionen müssen insbesondere Unternehmen die Ressourceneffizienz als leistungsstarken Innovationsmotor begreifen (vgl. BMBF 2006, Lovins 2008). *In dieser Arbeit wird das Konzept der Ressourceneffizienz als das für produzierende Unternehmen relevante Destillat der politisch-gesellschaftlichen Anforderungen an Nachhaltigkeit, Umwelt- und Klimaschutz sowie an Innovativität und zukünftige Bedarfsorientierung verstanden* (vgl. Jörissen et al. 2008, Bleischwitz et al. 2009, Herrmann 2010).

Aktuelle Studien zeigen, dass sich diese Erkenntnis in der letzten Zeit auch bei produzierenden Unternehmen verstärkt durchsetzt (Erhard, Pastewski 2010, BDI 2008). Gerade die Entsprechung von Anforderungen aus einschlägigen Regelwerken und die Auslösung von Wachstumspotenzialen sind für den effizienten Ressourceneinsatz hiernach von Interesse. Letztere können dabei etwa durch die Senkung von Kosten und Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit unterstützt werden (vgl. VDMA, Roland Berger 2009). Vorhandene Chancen sind sowohl für Hersteller als auch Anwender gegeben.

Die **Umsetzung der Ressourceneffizienz** kann sowohl durch handlungsorientierte als auch technische Maßnahmen erfolgen (Faulstich, Leipprand 2009). In einigen Unternehmen werden etwa Produkte schon mittels spezieller Managementsysteme und -methoden erfolgreich umweltgerecht gestaltet, um Umweltlasten proaktiv zu reduzieren. Der Handlungsspielraum kann dabei von relativ einfach umzusetzenden Optimierungen bis zur System-Innovation reichen. Für die Strategien der Effizienz und Konsistenz bieten besonders emergente Technologien vielversprechende Potenziale, da sie alternative Lösungen aufzeigen, die die Erfüllung eines Bedürfnisses unter Einsatz weniger Ressourcen leisten können (Jörissen et al. 2008).

In der Praxis der Unternehmen wird nach dem heutigen Stand eine solche Umsetzung allerdings nach wie vor durch verschiedene Hemmnisse erschwert, etwa aufgrund von methodischen Defiziten (vgl. Eversheim et al. 2010). Gilt es etwa, die erwähnten Ressourceneffizienzpotenziale emergenter Technologien bedarfsgerecht zu identifizieren und daraus konkrete ganzheitlich nutzensteigernde Anwendungsmöglichkeiten in Produkten abzuleiten und zu implementieren, ist dies bisher kaum oder nur mit großem Aufwand durchführbar.

Vor diesem Hintergrund lässt sich die **Problemstellung dieser Arbeit** wie folgt fokussieren: Hersteller von Investitionsgütern benötigen methodische Unterstützung bei der bedarfsgerechten Umsetzung des Konzepts der Ressourceneffizienz mittels emergenter Technologien in deren Produkten – unter Wahrung eines ganzheitlichen Nutzens beim Anwender.

3.2 Ressourceneffizienzorientierte Technologiebewertung

3.2.1 Technologien managen

Ein **langfristiges Überleben** von Unternehmen gelingt nur, wenn sie in der Lage sind, sich in innovativer Weise den äußeren wechselnden Anforderungen und der zunehmenden Dynamik auf den Weltmärkten anzupassen (vgl. Bullinger 1994, Spath, Warschat 2008). Die

⁵⁴ Z. B. sog. Energieeffizienztische.

notwendigen Maßnahmen zur Sicherung einer strategischen Erfolgsposition müssen dabei ganz wesentlich auf dem Gebiet der Technologien erfolgen (Bullinger 2008, Untiedt 2009). Damit stellt die unternehmenseigene Technologie- und Wissensbasis die Grundlage für neue Wettbewerbsvorsprünge und zukünftige Erfolgspotenziale dar (Zahn 1995). Denn die technologische Kompetenz fließt wertschöpfend in neue Lösungen ein, etwa in die Entwicklung technologischer Lösungsalternativen im Produktentwicklungsprozess (Bullinger 1994, Herstatt, Verworn 2007, Gerybadze 2004).

Die Grundlage für die Auswahl und den Einsatz von Technologien zur Stärkung der Wettbewerbsposition des Unternehmens wird durch dessen Wettbewerb- und Technologiestrategie bestimmt (Gomeringer 2007). Der gesteuerte **Umgang mit Technologien** und die Gestaltung des daraus erzielbaren Innovationspotenzials ist Gegenstand des Technologiemanagements (Lichtenthaler 2002, Tschirky, Koruna 1998). Das zielgerichtete Erreichen zukünftiger Erfolge setzt auch das frühzeitige Erkennen von marktbestimmenden Trends wie Ressourceneffizienz (vgl. Kap. 3.1.3) sowie entsprechendes Reagieren bei technologischen Überlegungen voraus (Neugebauer et al. 2008).

Das Management von Technologien erfordert neben der systematischen Differenzierung von Technologiefeldern auch ein Verständnis über mögliche Entwicklungspotenziale von Technologien, um jene, die betrachtet werden sollen, in einer ganzheitlich verantwortungsbewussten Weise einsetzen zu können.

3.2.1.1 Systematisierung von Technologien

Technologien lassen sich nach verschiedenen Mustern entsprechend ihrer Merkmale einteilen und systematisieren (vgl. auch Spur 1998). Eine solche Systematisierung von bekannten Technologien kann kaum eindeutig sein. Viele Technologiebereiche überschneiden sich, sind voneinander abhängig oder beeinflussen sich gegenseitig. So hängt der Einsatz neuer Materialien beispielsweise von ihrer Verarbeitbarkeit und der benötigten Prozesstechnik ab.

Eine Systematisierung kann **angelehnt an den Technologielebenszyklus** stattfinden. Insbesondere unterscheidet man bei dieser Untergliederung entsprechend einer zukünftigen oder einer gegenwärtigen Wirkung auf den Wettbewerb zwischen (vgl. Servatius 1985):

- *neue Technologien*, deren wirtschaftliche Realisierung mit hohen Unsicherheiten behaftet ist
- *Schrittmachertechnologien*, die zukünftige, bedeutende Auswirkungen auf das Marktpotenzial und die Wettbewerbsdynamik erkennen lassen
- *Schlüsseltechnologien*, die aktuell in dem betrachteten Umfeld eine hohe Beeinflussung der Wettbewerbsfähigkeit aufzeigen
- *Basistechnologien*, die gewissermaßen einen Industriestandard beschreiben, d. h. diese werden von den Unternehmen in ähnlichem Maße beherrscht und sind oftmals allgemein verfügbar
- *verdrängte Technologien*, die durch andere eine Ersetzung erfahren

Eine weitere Differenzierung im Bereich der neuen aufkommenden Technologien kann mit der Definition des Begriffs **emergente Technologien** geschaffen werden (vgl. Gerpott 2005). Der Begriff „emergent“ beinhaltet in dem Verständnis dieser Arbeit die Eigenschaften: neue Funktionsweisen, hohe Eindringtiefe in Systeme, große Hebelwirkung in bestehende und neue Industrien, mit Unsicherheiten behaftet und konvergent im Sinne von disziplinübergreifend (vgl. Day et al. 2000, Wallentowitz et al. 2009).

Bei emergenten Technologien handelt es sich folglich um junge, hochinnovative Technologien, die auf besonders neuen technologischen Entwicklungen mit wissenschaftlichen Grundlagen aufbauen, womit stark forschungsbasierte Potenziale verbunden sind. Diese stehen noch vor der breiten Diffusion in den Markt, lassen jedoch eine besondere zukünftige, gesellschaftliche und wirtschaftliche Relevanz erwarten (vgl. Day et al. 2000, BMBF 2006).

Begründen lässt sich dies mit neuen Paradigmen und Funktionsweisen und damit dem inhärenten Potenzial, als neue Ziel-Mittel-Kombinationen Innovationen zu ermöglichen (Hauschildt 2004). Dabei ist das Mittel „emergente Technologie“ und das Ziel „Produktleistung“ so auf neue Weise zusammenzuführen, dass ein wirtschaftlicher Erfolg möglich wird. In dieser Arbeit stehen diese emergenten Technologien im Mittelpunkt der Betrachtung – speziell jene, denen in der momentanen wissenschaftlichen Diskussion ein großes Potenzial zur Einsparung von Ressourcen zugesprochen wird (vgl. Schippl, Jörissen 2010, Eversheim et al. 2010). Diese sind in Kap. 4.1.2 dargestellt.

3.2.1.2 Entwicklungspotenziale von Technologien

Die Annahme der Ersetzbarkeit einer etablierten technologischen Lösung durch eine neue Alternative ist mit einer konstanten Beobachtung und Bewertung des technologischen Unternehmensumfelds verbunden, da es fortwährenden Veränderungen unterliegt (Kobe 2001).⁵⁵ Mittels Methoden wie dem S- Kurvenkonzept kann die **Entwicklung der Leistungsfähigkeit einer Technologie** in Abhängigkeit von der Zeit bzw. von den getätigten Entwicklungsinvestitionen veranschaulicht werden (Foster 2006). Einerseits kann eine Technologie im Sinne einer graduellen Veränderung weiterentwickelt werden, andererseits kann diese auch durch eine neue ausgetauscht bzw. substituiert (vgl. Kap. 3.2.1.4) werden, was eine grundsätzliche Veränderung darstellt.⁵⁶ Letztere wird als Technologiesprung oder als technologische Diskontinuität charakterisiert und kann die Umsetzung einer Konzept- oder System-Innovation (vgl. Kap. 3.1.4.2) bedeuten. Werden diese Prozesse vom Unternehmen ganzheitlich erfolgreich gestaltet, so können damit auch Chancen zur Steigerung der Ressourceneffizienz eines Produktes ermöglicht werden (Lang-Koetz et al. 2010).

Neben der technologischen Leistungsfähigkeit kann als ein Maß für die weiter gefasste Attraktivität einer Technologie das **Technologiepotenzial** angenommen werden (vgl. Wolfrum 1991, Wallentowitz et al. 2009, Mild 2002). Dieses definiert sich über den Erfüllungsgrad einer Funktion durch eine bestimmte Technologie (Ardiilio, Laib 2008). Der Erfüllungsgrad kann sich dabei in Abhängigkeit des Untersuchungskontextes und der gestellten Anforderungen auf unterschiedliche Kriterien bzw. Nutzenfacetten (z. B. Systemkompatibilität, Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz) beziehen, und vom Markt oder anderen Akteuren stammen (Pfeiffer, Weiß 1995, Mild 2002). Die Analyse des Technologiepotenzials kann so eine Verknüpfung der aus Technologien abzuleitenden Lösungspotenziale⁵⁷ bzw. dem „Technologie Push“ mit den gestellten Anforderungen und Problemstellungen⁵⁸ bzw. dem „Market Pull“, etwa seitens eines Produktes ermöglichen (Möhrle et al. 2005, Bullinger, Warschat 2007).

3.2.1.3 Nachhaltigkeitsorientierte Technologiegestaltung

Ein breiter politischer und gesellschaftlicher Konsens besteht darin, dass grundsätzlich jene **Technologien zu fördern** sind, die mit einer nachhaltigen Ressourcennutzung einhergehen. Wesentliche **Grundbedingungen** sind nach STRIGL u. a. Anwendungsbezogenheit, Zukunftsfähigkeit, Nutzenorientierung und ökologische Tragfähigkeit⁵⁹ (Strigl 2000).

⁵⁵ Das Erkennen von relevanten Technologien und technologischen Entwicklungen ist Ziel der Technologiefrühaufklärung bzw. Technology Intelligence (Lichtenthaler 2002).

⁵⁶ In der Praxis findet eine reine Substitution allerdings kaum statt.

⁵⁷ Diese werden im Verfahren im Kap. 5.3.2.2 durch die dort definierten Technologiebezogenen Ressourceneffizienz-Funktionen (TReF) beschrieben.

⁵⁸ Diese werden im Verfahren im Kap. 5.2.2.2 durch die dort definierten Produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktion (PReF) beschrieben.

⁵⁹ Hierzu gehört die Vermeidung des Rebound-Effekts. Dieser beschreibt das Risiko, dass die erwünschten Einsparungen – die durch den Einsatz einer effizienteren Technologie (im Vergleich zur alternativen Lösung) entstehen – durch eine stärkere Nutzung dieser überkompensiert werden können (Behrendt, Erdmann 2010).

Zur **Unterstützung** solcher Maßgaben sind verschiedene Instrumente entwickelt worden, die sich hinsichtlich Anspruch bzw. Zielstellung und damit Bewertungsrahmen und Umfang stark unterscheiden. Grundsätzlich handelt sich dabei eher um holistische Konzepte, die eine ganzheitliche Bewertung von Technikfolgen für die Gesellschaft leisten und zentrale Anforderungen an Technologiebewertung definieren.

3.2.1.3.1 Zentrale Instrumente einer sozial- und umweltverträglichen Technologieentwicklung

Das Ziel des übergreifenden Instruments der **Innovations- und Technikanalyse (ITA)** ist es, Technologieentwicklungen sozial- und umweltverträglich zu gestalten (Specht, Möhrle 2002). Dabei setzt sie im Sinne der problemlösungsinduzierten, innovativen Technikbewertung (VDI 3780) früh an, wenn technische Lösungen für gegebene Probleme gesucht werden und diese anschließend bezüglich ihrer Vor- und Nachteile analysiert werden (Baron, Zweck 2001, Schäppi et al. 2005). In diesem Analyseprozess gilt es auch, frühzeitig externe Experten und Stakeholder zu integrieren. Dabei sollen ökologische und andere gesellschaftliche Aspekte von Innovationen im Mittelpunkt stehen (Baron, Zweck 2001, Specht, Möhrle 2002). Um ein proaktives Agieren zu ermöglichen, kann die ITA auch prognostische Elemente wie Szenarios (vgl. Kap. 3.2.3.1.3) einsetzen.

Die **Technikbewertung** nach VDI 3780 bedeutet das planmäßige Vorgehen, das u. a. technische, ökonomische und ökologische Folgen einer Technik und möglicher Alternativen abschätzt sowie aufgrund definierter Ziele und Werte beurteilt (VDI 3780). Dabei gilt es „...einen möglichst sinnvollen Gebrauch von den stets nur in begrenztem Umfang vorhandenen Ressourcen (Rohstoffe, Energie, Arbeit, Zeit, Kapital usw.) zu machen...“ (VDI 3780).⁶⁰

Ein spezieller Ansatz zur Orientierung einer Technikentwicklung am Leitbild „Nachhaltige Nanotechnologien“ wird seit einiger Zeit unter dem Stichwort „Green Nano“⁶¹ diskutiert. Dabei geht es zum einen um einen Umwelt und Ressourcen entlastenden Einsatz von Nanomaterialien, zum anderen um eine nachhaltigere Gestaltung von Herstellungsprozessen und risikoarmen Nanoprodukten (vgl. von Gleich 2009).

Bezogen auf ein Unternehmen bietet das Instrument des integrierten Technologiemanagements ein frühzeitiges Identifizieren und Begleiten von Technologien, um nicht intendierte Risiken mit einer zielgerichteten Förderung der Innovationen zu minimieren. Dabei werden Ansätze des Technologiemanagements sowie Technologiefrüherkennung mit der ITA kombiniert (Baron 2004, Specht, Möhrle 2002).⁶²

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die genannten Instrumente eher allgemeinhandlungsleitend zu verstehen sind, da sie auf einem hohen Aggregationsniveau ansetzen, gemeinwohlorientiert sind und kaum unternehmerische Interessen berücksichtigen (vgl. Grunwald 2002a). Sie bieten über die Formulierung des Rahmens (geltende Grundbe-

⁶⁰ Zwischen diesen und noch weiteren in der Norm genannten Zielen bestehen verschiedene Instrumental- und Konkurrenzbeziehungen. Bei jeder Technikbewertung stellt sich die Aufgabe, die für den jeweiligen Fall relevanten Wertebereiche und Ziele zu bestimmen (VDI 3780).

⁶¹ ANSTAS und ZIMMERMANN haben die Ausrichtungen „Green Nano“ folgendermaßen beschrieben: “Green nano refers to the design of nanomaterials and processes through green chemistry and green engineering that results in the development of new performance characteristics (including beneficial environmental applications) without adverse consequences to humans and the biosphere (Anastas, Zimmerman 2007).

⁶² Eine unternehmensinterne ITA versucht, die erwähnten Aspekte möglichst früh zu erkennen und in der Entscheidung zu bedenken. Die Bewertung setzt in einer sehr frühen Phase der Entwicklung ein, in der die Parameter noch nicht endgültig definiert sind und daher noch beeinflusst werden können (Hauschildt 2004). Die Produktfolgenabschätzung (PA) verfolgt im Vergleich zur ITA einen pragmatischeren Ansatz und dient der Ermittlung von Informationen über die ökologischen und gesellschaftlichen Wirkungen von Produkten zur Entscheidungsvorbereitung im Unternehmen (Baron, Zweck 2001).

dingungen) und einzelner Elemente (wie etwa Expertenintegration) hinaus somit auch keine direkt nutzbaren methodischen Bausteine für die Aufgabenstellung dieser Arbeit.

3.2.1.4 Technologieeinsatz nach Maßgaben der Ressourceneffizienz

Aus relevanten Diskussionen lassen sich folgende **Ansätze** für einen ressourceneffizienzorientierten Technologieeinsatz ableiten (vgl. Coenen, Grunwald 2003, Spath, Warschat 2008):

- *substitutiver Ansatz*: Einsatz von Technologien, die in weitgehend unveränderten Nutzungskontexten, also bei bereits bekannten Technologien oder den bisherigen Stand der Technik in einem bekannten Aufgabenfeld, bestehende Technologien ersetzen und dadurch die Ressourceneffizienz erhöhen (Konkurrenztechnologie / Substitutionstechnologie)
- *komplementärer Ansatz*: Einsatz von Technologien, die mittels neuer Funktionalitäten zur Erreichung einer höheren Ressourceneffizienz und zu neuen Anwendungsmöglichkeiten führen (neues Technologiefeld)
- *neuartiger Ansatz*: Einsatz von ressourceneffizienten Technologien, die eine solche Reichweite aufweisen, dass etablierte Strukturen umgestaltet werden müssen. Bei Technologien mit solcher „Wirkungsmacht“ bzw. Eingriffstiefe müssen die Auswirkungen besonders umfassend und ganzheitlich bewertet werden.

Werden diese Ansätze in **Produkten umgesetzt**, sind entsprechende Technologien (Produkttechnologien) im Gegensatz zu Prozess- und Verfahrenstechnologien integrale Bestandteile der verkauften Leistung (Tschirky, Koruna 1998, Bullinger 1994) und aufgrund ihrer Hebelwirkung auch für das gesamte Produktleben (etwa erforderliche Herstellungsverfahren) von maßgeblicher Bedeutung (Specht, Möhrle 2002).

3.2.2 Technologienbewertung im Sinne der Ganzheitlichkeit

Zur **Umsetzung von strategischen Technologieentscheidungen** auf Unternehmensebene – speziell beim Technologieeinsatz – wird eine Bewertung benötigt, die technologische Alternativen in ihrer Gesamtheit überblicken und hinsichtlich der Übereinstimmung mit relevanten Anforderungen betrachten kann (Specht, Möhrle 2002). Dabei ist das primäre Ziel der Technologiebewertung auf Basis der sowohl intern als auch extern gesammelten Informationen, Potenziale von bestehenden und neuen technologischen Lösungen für das Unternehmen zu identifizieren und zu analysieren, um hierdurch strategische Erfolgspotenziale und Risiken für das Unternehmen abschätzen zu können (vgl. Specht, Möhrle 2002, Tschirky, Koruna 1998, Brockhoff 1999).

Unabhängig von der Ausrichtung ist es für die Technologiebewertung essentiell, dass problemspezifische **Kriterien** identifiziert und gewichtet werden, die sich je nach Anforderungen (z. B. aus Unternehmenszielen) und Bewertungsgegenstand auf unterschiedliche Aspekte beziehen können (vgl. Kap. 3.2.1.2).

*Aus unternehmerischer Perspektive sind für eine ganzheitliche Betrachtung die drei **Dimensionen** Funktionalität, Ressourceneffizienz und Ökonomie relevant (Abb. 8), welche integriert betrachtet werden müssen (vgl. VDI 3780, Schaltegger, Burritt 2000, BMU 2009a, Schimmelpfeng 1999, Reid, Miedzinski 2008, Vossler 2006).*

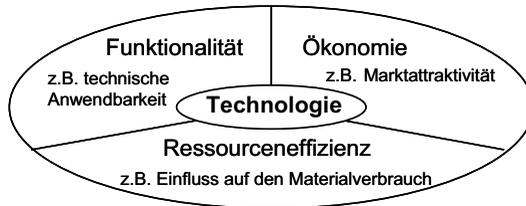


Abb. 8: Die für eine ganzheitliche Bewertung von Technologien relevanten drei Dimensionen mit beispielhaften Kriterien

Die Dimension der *Funktionalität* berücksichtigt etwa die technische Anwendbarkeit und ist somit von grundlegender Relevanz. Die Dimension der *Ressourceneffizienz* zielt auf die Sicherstellung eines lebenszyklusweit geminderten Ressourcenverbrauchs etwa durch eine materialverbrauchsreduzierte Konstruktionsweise wie den Leichtbau und ist damit für eine Technologieentscheidung von besonderer strategischer Bedeutung (vgl. Angerer et al. 2009).⁶³ Die Gewinnung technologiespezifischer und damit lösungsprinzipspezifischer Informationen zu Ressourcen ist allerdings **außerordentlich komplex** und aufwändig, weil die Fragestellungen des Verbrauchs und Bedarfs von technischen Innovationen bisher kaum Beachtung gefunden hat (Angerer et al. 2009). Die benötigten Informationen sind sowohl auf Angebotsseite (z. B. Bergbausektoren) als auch Nachfrageseite (z. B. verarbeitendes Gewerbe) breit gestreut. Mit der Dimension der *Ökonomie* gilt es, die Konformität mit betriebswirtschaftlichen Zielgrößen wie Kostenreduktion, Gewinnmaximierung und Marktattraktivität lebenszyklusweit (vgl. Kap. 3.2.3.2.1) sicherzustellen (vgl. Zehbold 1996). Dem Hersteller eines Produktes dient diese Betrachtung der differenzierten Information über Kosten, um das Produkt entsprechend optimieren und so für den Anwender günstige Alternativen bereitstellen zu können (Herrmann 2010). Diesen unterschiedlichen Perspektiven ist je nach Anforderung mittels geeigneter Kriterien (vgl. Abb. 8) zu entsprechen. Durch das Beurteilen dieser Kriterien werden sowohl Schwächen als auch Stärken der Technologie und der Erfüllungsgrad, bezogen auf die Zielforderung sichtbar (VDI 3780).

Innerhalb einer Bewertungsphase muss häufig mit **unsicheren Informationen** zu dem ganzheitlichen Nutzenpotenzial eines Technologieeinsatzes gearbeitet werden, da sowohl das Unternehmensumfeld als auch die betrachtete Technologie an sich eine dynamische Weiterentwicklung erfahren kann (Löffler 1997). Hierbei kann generell davon ausgegangen werden, dass, je emergenter (vgl. Kap. 3.2.1.1) eine Technologie ist, desto größer auch die Komplexität und die Unsicherheit über Entwicklungspotenziale ist. Dies kann im ungünstigen Fall das Verfehlen der anvisierten Ziele zur Folge haben (Wallentowitz et al. 2009). Das Problem der Datenqualität und -verfügbarkeit wird speziell für die Ressourceneffizienzbewertung in Kap. 3.2.3.2 erläutert und in Kap. 5.4.2 erneut aufgegriffen.

Wie einleitend vorgestellt, sind bei der Bewertung von Technologien die drei Dimensionen **integriert zu betrachten**. Dies ist notwendig, da etwa eine Technologie, die unter Beachtung der ausgewählten Bewertungskriterien den höchsten Einzelwert im Vergleich zu alternativen Technologien offenbart, nicht zwangsläufig die beste Lösung darstellen muss. So ist eine Technologie per se weder ressourceneffizient noch nicht ressourceneffizient, dies ist abhängig vom Anwendungskontext (vgl. Grunwald 2002b, Ritthoff et al. 2002). Insbesondere bei der Bewertung von emergenten Technologien ist zudem die Kompatibilität mit bereits im Unternehmen bzw. von Entwicklungspartnern etablierten Technologien von Bedeutung, um

⁶³ Gilt es darüber hinaus, die Umweltverträglichkeit zu sichern, müssen neben der Ressourceneffizienz zusätzliche Indikatoren wie die Toxizität von Emissionen berücksichtigt werden (Dewulf, van Langenhove 2005). Bei diesen ist im Gegensatz zur Ressourceneffizienz eine direkte ökonomische Relevanz schwer darstellbar, weshalb sie in dieser Arbeit keine Betrachtung finden.

die Umsetzbarkeit abschätzen zu können (Mild 2002). Hier mangelt es allerdings häufig an entsprechenden Erfahrungen im Unternehmen.

Bei dem Ziel einer ressourceneffizienten, innovativen Lösung als neue Ziel-Mittel-Kombination (Kap. 3.1.1) liegt die Herausforderung darin, die richtige Technologie für ein Produkt zur Sicherung des nachhaltigen Erfolges zu finden. Grundsätzlich gilt es, aufkommenden **Zielkonflikten** bei der Entwicklung einer Lösung etwa zwischen der Ressourceneffizienz und der Ökonomie aktiv zu begegnen (Ruud, Larsen 2003, Vossler 2006). Benötigt werden hierzu strategische Unternehmensentscheidungen auf Basis von aussagekräftigen Bewertungsergebnissen.

Erzielte Ergebnisse einer Technologiebewertung ermöglichen die Abwägung von Lösungen hinsichtlich ihrer Vorteile gegenüber bisherigen Lösungen etwa unter Berücksichtigung ihres ganzheitlichen Nutzens und deren Auswahl für die Umsetzung im Produkt (Specht, Möhrle 2002).

3.2.3 Methoden der Technologiebewertung

Ziel einer **Bewertung** ist eine Prioritätenbildung von Alternativen, d. h. es wird eine vergleichende, ordnende oder quantifizierbare Einstufung vorgenommen, um eine Entscheidung vorzubereiten (vgl. VDI 3780, Geschka 1995).⁶⁴ Für die Technologiebewertung gilt es im Besonderen, diesbezügliche Informationsasymmetrien speziell bei emergenten Technologien zu vermeiden (Pfeiffer, Weiß 1995). Dafür sind neben präzisen (quantitative) auch unscharfe (qualitative) Informationen zu nutzen. In der Literatur finden sich zahlreiche Bewertungsmethoden dieser Art mit unterschiedlichen Zielstellungen (VDI 3780). Solche Methoden sind auch ein wesentliches Instrument zielgerichteter Problemlösungsprozesse und der Produktentwicklung (vgl. Specht, Möhrle 2002).

Die im Folgenden vorgestellten **Methoden** wurden in Abgleich mit der Zielsetzung (Kap. 2.1) und der Problemstellung (Kap. 3.1.5) ausgewählt. Daraus lässt sich ableiten, dass Hersteller eine methodische Unterstützung bei der Umsetzung des Konzepts der Ressourceneffizienz in Investitionsgütern benötigen. Hierfür gilt es, auf Basis von nutzungsphasenbezogenen Ressourceneffizienzpotenzialen im Produkt die relevanten emergenten Technologien aus der Forschung nach deren Funktionalität, Ressourceneffizienz und Ökonomie zu bewerten. Daraus lassen sich passende alternative Lösungsprinzipien zur Optimierung der Produktnutzungsphase aufwandsreduziert ableiten. Bei den gewählten Methoden handelt es sich um eine Auswahl von praxisrelevanten qualitativen⁶⁵ und quantitativen⁶⁶ Methoden zur Technologiebewertung mit einer nutzenbezogenen und einer ressourceneffizienzbezogenen Ausrichtung.

3.2.3.1 Nutzenbezogene Technologiebewertungsmethoden

Da Ideen, deren Nutzen nicht eindeutig ist, kaum in erfolgreiche Produkte umgesetzt werden können, werden nutzenbezogene Bewertungsmethoden eingesetzt (vgl. Kröll 2007). Hier sind speziell jene Methoden von Interesse, die im Umfeld des Technologiemanagements eine bedarfsgerechte Bewertung des Nutzenpotenzials einer Technologie erlauben und eine

⁶⁴ Eine Bewertung stellt eine Verknüpfung einer Sachebene auf einer Wertebene dar. Werte wie Nachhaltigkeit unterliegen dabei einem stetigen Wandel und unterscheiden sich in Abhängigkeit des Anwenders – sind also subjektiv (VDI 3780).

⁶⁵ Qualitative Bewertungen kommen dann zur Anwendung, wenn für Bewertungskriterien keine exakten Zahlenwerte vorliegen oder diese nicht in einheitlichen Dimensionen ausgedrückt werden können.

⁶⁶ Quantitative Bewertungen erfolgen aufgrund monetärer Zielgrößen, d. h. ökonomisch relevanter Rechengrößen, und nichtmonetärer, aber quantitativer Zielgrößen, wie sie z. B. bei der Nutzwertanalyse angewandt werden.

hohe Verbreitung in der Praxis haben. Für die meisten Methoden finden sich in der Literatur methodischen Anpassungen, die auch die mehr oder weniger umfassende Berücksichtigung ökologischer Aspekte ermöglichen. Im Folgenden werden die Methoden House of Technology, Technologieradar und Szenario-Technik vorgestellt und kritisch gewürdigt. Weitere gängige Methoden finden sich in der Tab. 33 im Anhang, Kap. 10.1.3.

3.2.3.1.1 House of Technology

Das House of Technology wurde analog zum House of Quality im Quality Function Deployment (QFD) entwickelt (Lentes, Richter 2004). Bei dem House of Technology (HoT) sind anstelle der Kundenanforderungen die Funktionen des Produktes von Relevanz (Bullinger et al. 2003). In einer Korrelationsmatrix werden die Beziehungen zwischen den Funktionen des Produktes und verschiedene Technologieelemente (Lösungsprinzipien) abgebildet mit dem Ziel, passende Lösungen zu identifizieren. Aus der Beziehungsstärke zu den Funktionen können für die Lösungsprinzipien Prioritäten festgelegt werden (Lentes, Richter 2004).

Die Methode des HoT bietet eine **kompakte und transparente Darstellung** der Produktfunktionen und technologischen Lösungsprinzipien zur Überprüfung deren funktionaler Kompatibilität. Hierdurch ist eine Bewertung der Dimension Funktionalität mit vertretbarem Aufwand durchführbar. Eine ganzheitliche Bewertung muss aber zusätzlich ressourceneffizienzbezogene und ökonomische Anforderungen berücksichtigen. Insbesondere die Ressourceneffizienz muss detailliert und auch strukturiert erfasst werden. Dazu reicht es nicht aus, Produktfunktionen zu beschreiben. Vielmehr müssen auch bekannte ressourcenverbrauchsbezogene Schwachstellen berücksichtigt werden, die die Auswahl passender Lösungsprinzipien erst ermöglichen. Existierende Ansätze zur Berücksichtigung ökologischer Anforderungen wie das Öko-QFD leisten dies nicht (Abele et al. 2008, Hermenau 2008).

3.2.3.1.2 Technologieradar

Unter dem Begriff „Technologieradar“ werden hier Ansätze subsumiert, die dazu dienen, Technologietrends unternehmensspezifisch bewerten und einschätzen zu können. Ein solcher ist das TechnologieRadar des Fraunhofer IAO (Lang-Koetz et al. 2008). Dabei wird für das Unternehmen ein individuelles Technologiebedarfprofil erstellt, wobei der aktuelle Informationsstatus in Bezug auf Technologien, Markt und Unternehmensumwelt als Basis dient. Anhand des Technologiebedarfprofils identifizieren unternehmensexterne Experten anschließend relevante technologische Trends und bewerten diese in einer individuellen Potenzialanalyse. Die Bewertung erfolgt nach einem Kriterienkatalog bzgl. Marktaspekten und technischer Machbarkeit. Letztendlich gilt es, einen Wissenstransfer zu ermöglichen, um gemeinsam mit Experten innovative Ideen zu erarbeiten und zu bewerten. Das Ergebnis liefert Handlungsempfehlungen (Lang-Koetz et al. 2008).

Ein Technologieradar hilft dabei, unternehmerische Entscheidungen zur **Ausrichtung der Technologiestrategie** mittels Unterstützung durch externe Experten fundiert zu treffen. Hierbei können insbesondere emergente Technologien betrachtet werden. Es finden sich in der Literatur auch Ansätze zur Fokussierung auf Fragestellungen und Anforderungen im Kontext der Ressourceneffizienz (Pastewski 2009). Allerdings erlaubt die Methode als solche keine fundierte ganzheitliche Bewertung für identifizierte Alternativen. Die benötigten Anforderungen an die Präzision einzelner Bewertungsaspekte kann nicht methodisch abgebildet werden. Zudem unterstützt die Methode eher die strategische Produktplanung als die Produktweiterentwicklung.

3.2.3.1.3 Szenario-Technik

Die Szenario-Technik stellt eine Methode zur strategischen Planung definierter Gestaltungsfelder wie Produkte und Technologien dar und ist eine anerkannte Vorgehensweise zum Entwickeln von zukunftsrobusten Entwicklungsstrategien für Unternehmen. Ein Gestaltungs-

feld stellt einen abgegrenzten Sachzusammenhang mit wirksamen Beziehungen dar, der äußeren Einflussfaktoren unterliegt (Wilms 2006). Unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen werden in sich konsistente Zukunftsprojektionen aufgestellt. Aus diesen werden schließlich die denkbaren Szenarios⁶⁷ gebildet und somit ein breiter Blick auf alle mögliche Entwicklungen geleistet. Wesentliches Ziel der Methode ist das frühzeitige **Erkennen von Chancen und Gefahren**, um Entscheidungen etwa im Rahmen der Technologiefrühaufklärung (vgl. Kap. 3.2.1.2) ableiten zu können (Gausemeier et al. 2001).

Die Szenario-Technik ist eine in der Praxis etablierte Methode, die allerdings mit einem relativ großen Aufwand verbunden ist (Gassmann, Kobe 2006). Die vielseitige Einsetzbarkeit ermöglicht allerdings die Verwendung in unterschiedlichen Bereichen und Anwendungskontexten. Aufgrund der Eignung für die Entwicklung eines systematischen Blicks in die Zukunft wurde die Methode auch schon zur Ermittlung von langfristigen Nachhaltigkeitsfaktoren für die Produktentwicklung eingesetzt (vgl. Stark et al. 2008). Damit ist die Methode für die qualitative Einschätzung von etwaigen zukünftigen Risiken einer Technologie geeignet. Darüber hinaus bietet sie jedoch wenig methodisches Gerüst im Sinne der Aufgabenstellung dieser Arbeit.

3.2.3.2 Ressourceneffizienzbezogene Technologiebewertungsmethoden

Im Vergleich zu den nutzenbezogenen Methoden stellen die ressourceneffizienzbezogenen Methoden hier typische Methoden im **Umfeld der Umweltwirkungsbewertung** dar, die eine mehr oder weniger ausgeprägte Bewertung des Ressourceneffizienzpotenzials einer Technologie erlauben. Sie unterscheiden sich in Hinblick auf Wertgrundlagen, Anwendungsbereiche und ihre Kommunikationseigenschaften (Abele et al. 2008, Schaltegger, Burritt 2000).

Bei den etablierten Methoden (vgl. auch Ausführungen zu Managementmethoden in Kap. 3.1.4.1) handelt es sich im Wesentlichen um solche Methoden, die die Umweltwirkungen einer Technologie retrospektivisch beschreiben, wenn also wesentliche Parameter bereits bekannt sind. *Ressourceneffizienz wird dabei i.d.R. nicht vordergründig betrachtet, aber meist als Teilaspekt mitberücksichtigt.* Die wissenschaftlich bedeutsamste Methode der Umweltwirkungsbewertung ist die Ökobilanz, die auch als ökologische Lebenszyklusanalyse (LCA)⁶⁸ bezeichnet wird. Eine Lebenszyklusanalyse aus ökonomischer Perspektive ist mit der Methode des Life Cycle Costings leistbar. Für eine vereinfachte und praxisgerechte ökologische Umweltwirkungsbewertung wurden darüber hinaus verschiedene Kurzbilanzierungsmethoden wie die Methode *Materialinput pro Serviceeinheit* (MIPS) sowie eine Reihe kommerziell verfügbarer Lösungen entwickelt (Atik 2001, Hermenau 2008). Die Ergebnisse dieser Methoden weisen in den meisten Fällen eine für viele Ausgangsfragestellungen ausreichende Richtungsgleichheit mit den Ergebnissen aus umfassenderen Methoden wie Ökobilanzen auf (Atik 2001).

Aufgrund der bei den meisten umweltorientierten Methoden häufig benötigten Vielzahl an erforderlichen Daten ist die Sicherstellung der **Datenverfügbarkeit und -qualität**⁶⁹ von besonderer Bedeutung. Diese Komplexität hängt maßgeblich mit der Beachtung des Lebenszyklusgedankens zusammen. Daten müssen aufgenommen (z. B. gemessen), aus Daten-

⁶⁷ Ein Szenario wird als eine allgemeinverständliche und nachvollziehbare Beschreibung einer Situation in der Zukunft verstanden, die auf einem Netz von Einflussfaktoren beruht (Gausemeier et al. 2001).

⁶⁸ Englischer Fachbegriff ist „Life Cycle Assessment“ (LCA).

⁶⁹ Es sind vereinfacht drei Fälle von Datenverfügbarkeit möglich (vgl. VHK 2005): (1) widersprüchliche Datenquellen im Falle von umfangreich vorhandener Daten, (2) zu wenig detaillierte Daten etwa bei sehr jungen bzw. sehr wettbewerbsorientierten Technologien oder (3) unvollständige Daten.

banken⁷⁰ entnommen oder – wenn keine Daten generierbar sind – möglichst realistisch (etwa auf Basis von Ähnlichkeiten) abgeschätzt werden. Oft sind Wechselwirkungen zwischen Produkt und Umwelt nur schwer zu ermitteln und zu bewerten. Der Stand der Wissenschaft lässt vielfach auch nur eine gegenwartsbezogene Einschätzung zu. Durch den weltweiten Handel mit Rohstoffen und Vorprodukten sind deren Daten zu Herkunft, Behandlung und Herstellung zudem auch nicht immer ermittelbar. Die Herausforderung liegt im richtigen Aufwand-Nutzen Verhältnis, um Objektivität und den notwendigen Detaillierungsgrad zu gewährleisten (VHK 2005). Dies gilt insbesondere für die Betrachtung emergenter Technologien. Zu diesen stehen meist nur wenige Informationen so etwa bzgl. konkreter Anwendungsbedingungen zur Verfügung. Hier müssen häufig qualitative Abschätzungen unter Berücksichtigung von Expertenmeinungen getroffen werden bzw. mit nicht vermeidbaren Datenlücken weiter gearbeitet werden (vgl. Rohn et al. 2010).

Im Folgenden werden der Ansatz des Life Cycle Costings sowie ausgewählte quantitativ-eindimensionale Kurzbilanzierungsmethoden⁷¹ vorgestellt.⁷² Die Methode der Ökobilanz ist in Tab. 33 im Anhang (Kap. 10.1.3) beschrieben.

3.2.3.2.1 Life Cycle Costing

Laut aktuellen Untersuchungen berücksichtigen insbesondere die Anwenderbranchen des Maschinen- und Anlagenbaus zunehmend sämtliche **über die Laufzeit anfallenden Kosten** bei deren Kaufentscheidung und nicht nur die Investitionskosten für ein neues Investitionsgut (vgl. VDMA, Roland Berger 2009).

Zwecks einer daher erforderlichen Ergänzung der Lebenszyklusbetrachtung um die Kostenperspektive wurde der Ansatz des Life Cycle Costing (LCC) oder auch Total Cost of Ownership (TCO) zur Berücksichtigung der gesamten Lebenszykluskosten⁷³ entwickelt (vgl. Zehbold 1996). Im Rahmen des LCC sollen somit nicht nur die unmittelbaren Kosten, die mit dem Erwerb zusammenhängen, sondern auch die Kosten für die Nutzung (den Betrieb, die Wartung und die Instandhaltung)⁷⁴ berücksichtigt werden, welche breit über die Wertschöpfungsstufen verteilt sind (VDI 2000). Letztere sind häufig deutlich höher als die Investitionskosten, aber gleichzeitig weniger „sichtbar“ und wurden daher bisher häufig nicht entsprechend bei Investitionsentscheidungen berücksichtigt.⁷⁵ Gilt es aus Anwendersicht, die günstigste Kostensituation bezogen auf den gesamten Lebenszyklus zu erreichen, so muss das Optimum zwischen den Investitionskosten und Instandhaltungskosten gefunden werden (Bünting 2009).

Zur Beschreibung und Kalkulation von Kosten gibt es eine Reihe von unterschiedlichen Modellen, wobei die meisten zur Identifikation der Teilkosten den Lebenszyklus in Abschnitte

⁷⁰ Für die Berechnung umweltbezogener Daten stehen inzwischen eine Reihe kostenloser und kommerzieller Datenbanken zur Verfügung, die auf unterschiedlichen Berechnungsmodellen beruhen und in der Regel auf die Anwendung in einer bestimmten Methode abzielen.

⁷¹ Kurzbilanzierungsmethoden stellen zur Komplexitätsreduktion i. d. R. die ökologische Wirkungsabschätzung in einer mehr oder weniger aggregierten Kennzahl dar (Ulmschneider 2006).

⁷² Qualitative Methoden wie die ABC-Analyse oder andere verbal-argumentative Bewertungen werden aufgrund der untergeordneten Bedeutung für diese Arbeit hier nicht diskutiert (Ulmschneider 2006).

⁷³ Die Definition dieser lautet nach dem VDMA Einheitsblatt 34 160: „Unter Lebenszykluskosten wird im Sinne dieses Blattes die Summe aller zum bestimmungsgemäßen Gebrauch einer geeignet ausgelegten Maschine oder Anlage erforderlichen Aufwendungen von der Anschaffung bis zur Entsorgung verstanden“ (VDMA 2006).

⁷⁴ Z. B. Betriebspersonalkosten, Instandhaltungskosten (Präventive Instandhaltung), Reparaturkosten (Korrektive Instandhaltung) Energie- und Verbrauchskosten.

⁷⁵ In Unternehmen sind die Zuständigkeiten für Investitionskosten etwa von Anlagen und deren Betriebskosten häufig auf unterschiedliche Organisationseinheiten verteilt. Daher orientiert sich die Kaufentscheidung meist an den Kosten für die Anschaffung und nicht an den Lebenszykluskosten (vgl. Herrmann 2010).

wie „Anschaffung“, „Betrieb“, „Instandhaltung“ und „Verwertung“ unterteilen (Bünting 2009). Beim LCC ist es stets vorteilhaft, eine dynamische Investitionsrechnung⁷⁶ zu wählen, da die Kosten zeitlich berücksichtigt werden. So beurteilt die **Kapitalwertmethode** Investitionsalternativen auf Basis des Kapitalwerts, der dem Netto-Geldvermögen der Investition bezogen auf den Beginn der Investitionsdauer bei $t=0$ entspricht (vgl. Götze 2006). In der unternehmerischen Praxis findet diese Methode im besonderen Maße Anwendung (Herrmann 2010). Eine mögliche Vorgehensweise zur Berechnung des Kapitalwertes ist die nach WÜBBENHORST (Wübbenhorst 1984).

Die Ermittlung von korrekten und aussagekräftigen Kostendaten für das LCC wird als extrem schwierig sowie zeit- und kostenaufwändig angesehen (Schaltegger, Burritt 2000). Der Aufwand für eine Lebenszykluskostenberechnung hängt vom Umfang und dem Detaillierungsgrad des Berechnungsmodells ab. Um den Aufwand in einem vertretbaren Rahmen zu halten, sollte nicht versucht werden, alle Kosten zu erfassen, sondern nur die relevanten Kostentreiber zu definieren (Bünting 2009). Die von der LCC leistbare lebenszyklusweite Berücksichtigung relevanter Kosten – etwa mittels Kapitalwertmethode – kann allerdings die Dimension der Ökonomie im Rahmen einer ganzheitlichen Bewertung abbilden. Insgesamt bedarf es bei einer ganzheitlichen Bewertung allerdings auch qualitativer Bewertungsgrößen, die sich nicht allein durch Kosten ausdrücken lassen. Technisch-funktionale und ressourcen-effizienzbezogene Aspekte bleiben beim LCC gänzlich unberücksichtigt.

3.2.3.2.2 Kurzbilanzierungsmethoden

Aufgrund der Erkenntnis, dass die Durchführung einer Ökobilanz zur Bewertung der Umweltwirkungen in der Praxis nur eingeschränkt sinnvoll ist, wurden verschiedene Methoden für ein vereinfachtes und praxisgerechtes Vorgehen entwickelt. Für eine Betrachtung der Ressourceneffizienz sind die wichtigsten Methoden Materialinput pro Serviceeinheit (MIPS) und Kumulierter Energieaufwand (KEA) (vgl. Atik 2001).⁷⁷

Die MIPS-Methode wurde vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH entwickelt (vgl. Schmidt-Bleek 1998). Sie basiert auf einem **inputbezogenen Konzept** für die prospektivische Erfassung und Bewertung von lebenszyklusweiten Stoffströmen bzw. dem Ressourcenverbrauch. Angenommen wird, dass jeder Input auch zu einem Output wird – Inputgrößen jedoch bedeutend einfacher und genauer bilanziert werden können als etwa Emissionen, da es sich um eine begrenzte Anzahl von Stoffen handelt.⁷⁸

Für die **Erfassung und Bewertung des kumulierten Ressourcenaufwands** werden sogenannte Materialinput(MI)-Werte genutzt. Ein MI-Wert besitzt die Einheit der Masse an eingesetztem Material, also z. B. Kilogramm oder Tonnen. In die MI-Werte gehen sämtliche benötigten Materialien entlang des Lebenszyklus ein und werden für fünf nicht gewichtete Erhebungskategorien *abiotisches Material* (z. B. mineralische Rohstoffe, fossile Energieträger), *biotisches Material* (z. B. Biomasse), *Bodenbewegungen*, *Wasser* und *Luft* getrennt

⁷⁶ Die Statischen Verfahren der Investitionskostenrechnung betrachten eine Durchschnittsperiode oder eine repräsentative Periode und ignorieren bzw. pauschalisieren damit zeitliche Veränderungen. Dynamische Verfahren berücksichtigen mehrere Rechnungsperioden und beachten die unterschiedliche zeitliche Entstehung von Ein- und Auszahlungen durch Auf- bzw. Abzinsung auf einen bestimmten Bezugszeitpunkt mit Hilfe eines Kalkulationszinssatzes (vgl. Götze 2006).

⁷⁷ Eine weitere Methode basiert auf dem Eco-Indicator 99-Konzept, welches auf eine Initiative u.a. des niederländischen Ministeriums für Raumplanung, Bebauung und Umwelt (VROM) zurückgeht. Mit diesem Konzept wird ein schadensorientierter Ansatz verfolgt, der keine Wirkungs-, sondern Schadenskategorien zur Klassifizierung der Umweltauswirkungen nutzt (Ulmschneider 2006). Methodischer Vorläufer war das Konzept zum sog. Eco-Indicator 95 (Goedkoop et al. 1995).

⁷⁸ Weiterhin gilt, dass auf der Outputseite eines betrachteten Systems zum einen ein Vielfaches an Stoffen und zum anderen ein Vielfaches an Berührungspunkten mit der Umwelt im Vergleich zur Inputseite existiert (Schmidt-Bleek 1998).

ausgewiesen (Schmidt-Bleek 1998). Aus Sicht eines produzierenden Unternehmens sind in erster Linie die MI-Werte für das benötigte *abiotische Material* von Bedeutung, da hiermit auch unmittelbare Kosten verbunden sind (Rohn et al. 2009). Um den MI für eine Technologie zu bestimmen, müssen relevante vorgelagerte und nachgelagerte Stoffströme untersucht werden. Damit aufwändige Analysen nicht für jede Bilanzierung erneut durchgeführt werden müssen, gibt es sogenannte Materialintensitätswerte (MIT-Werte). Dies sind MI-Werte, die sich auf eine bestimmte Einheit wie Kilogramm oder Tonne beziehen.⁷⁹ Für zahlreiche Materialien und Dienstleistungen sind bereits MIT-Werte vorhanden.⁸⁰ Fehlende Werte können in Anlehnung an bestehende Werte ermittelt werden (Beucker 2006).

Durch den Bezug der MI-Werte auf eine Serviceeinheit, die dem erbrachten Nutzen entspricht, ergibt sich nach Formel 2 der MIPS-Wert (Ritthoff et al. 2002).

$$\text{MIPS} = \frac{\text{MI} \{ \text{Menge} \bullet \text{MIT} \}}{\text{S}}$$

(mit MIPS: Materialinput pro Serviceeinheit [kg/Serviceeinheit], MI: Materialinput [kg], Menge [kg, MJ etc.], MIT: Materialintensität [kg/kg, kg/MJ/kg etc.], S: Serviceeinheit [frei wählbar])

Formel 2: Berechnung des Materialinput pro Serviceeinheit

Trotz vorhandener Grenzen in der Aussagekraft⁸¹ stellt die MIPS-Methode einen in der Praxis **akzeptierten Bilanzierungs- und Bewertungsansatz** dar (Atik 2001). Ihr wichtigster Vorteil kann in der vergleichsweise leichten Anwendung gesehen werden. Mit vertretbarem Aufwand können quantitative Daten zur Bewertung der Dimension Ressourceneffizienz einer Technologie erarbeitet werden (Schmidt-Bleek 1998).

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) ist eine Methode, die den gesamten, **primärenergetisch bewerteten Aufwand** erfasst, der im Zusammenhang mit dem Lebenszyklus einer Technologie entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann (vgl. Atik 2001). Er setzt sich aus der Summe des Endenergieaufwands, des nichtenergetischen Aufwands und des stoffgebundenen Energieinhalts aller Komponenten bereinigt um den Bereitstellungsnutzungsgrad zusammen (vgl. VDI 4600).

Damit erfolgt die Berechnung von Energie- und Materialaufwand nicht wie bei MIPS in Masseneinheiten, sondern in Primärenergieäquivalenten. Der KEA berücksichtigt Primärenergieträger sowie primäre und sekundäre Rohstoffe ohne Berücksichtigung der Outputströme wie bei der MIPS-Methode (vgl. Oberender 2006). Die Methode eignet sich daher besonders gut zur Bewertung von Technologien, deren Umweltauswirkungen hauptsächlich auf die Umwandlung von Energie zurückzuführen sind. Für eine ressourceneffizienzbezogene Bewertung im Sinne der Aufgabenstellung dieser Arbeit ist die MIPS-Methode allerdings eher geeignet, da diese alle drei wesentlichen Ressourcenkategorien (vgl. Kap. 3.1.1) über den abiotischen Materialbedarf erfassen kann.

⁷⁹ Handelt es sich bei den relevanten Größen um Massen, Energien oder etwa Transportdistanzen, so ist die Bezugsseinheit ein Kilogramm oder Tonne eines Materials, eine Megawattstunde bzw. ein Tonnenkilometer. Je nach Bezugsseinheit können MIT-Werte dimensionslose Werte (z. B. kg/kg) oder Verhältniszahlen (z. B. kg/tkm) darstellen.

⁸⁰ So ist für die Berechnung von Materialintensitäten eine Liste von MIT-Werten auf dem Stand von 2003 unter folgendem Link des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie GmbH nutzbar: http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/MIT_v2.pdf.

⁸¹ Zentraler Betrachtungsgegenstand in der Bilanzierung ist der Materialfluss, wobei weder Knappheiten einzelner Ressourcen noch outputorientierte Faktoren wie Emissionen oder Toxizität berücksichtigt werden (Ritthoff et al. 2002; Schmidt-Bleek 1998).

3.2.4 Vergleich der beschriebenen Methoden

Tab. 2 vergleicht die beschriebenen Methoden der nutzen- und ressourceneffizienzbezogenen Technologiebewertung anhand von Kriterien. Diese Vergleichskriterien leiten sich aus der Zielsetzung (Kap. 2.1) und der Problemstellung (Kap. 3.1.5) der Arbeit ab. Sie betreffen den Bewertungszuschnitt, die Ganzheitlichkeit der Technologiebewertung, den Anwendungskontext und den Einsatz der Methode.

Tab. 2: Methoden der nutzen- und ressourceneffizienzorientierten Technologiebewertung

Ansätze	Kriterien		Bewertungs- zuschnitt			Ganzheitlichkeit			Anwendungskontext			Einsatz	
	Berücksichtigung der Charakteristika emergenter Technologien	Berücksichtigung des Lebenszyklus	Berücksichtigung technischer Anforderungen	Berücksichtigung ressourceneffizienzbezogener Anforderungen	Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher Anforderungen	Technologiestrategie	Prospektive Produktbewertung (ex ante)	Produktweiterentwicklung	Retropektive Produktbewertung (ex post)	Flexibilität und Kompatibilität	Aufwand		
House of Technology	●	○	●	○	○	●	●	●	○	●	●		
Technologiekalender	●	○	●	○	○	●	●	●	○	○	●		
Nutzwertanalyse	○	○	○	○	○	○	●	●	●	○	○		
Technologieradar	●	○	●	○	○	●	●	○	○	●	●		
Szenario-Technik	●	○	○	○	○	●	●	○	○	●	○		
Ökobilanzierung	○	●	○	●	○	○	○	○	●	○	○		
Life Cycle Costing	○	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○		
Kurzbilanzierungsmethoden (MIPS und KEA)	○	●	○	●	○	○	○	○	○	●	○		

Legende: größtenteils erfüllt ● teilweise erfüllt ○ größtenteils nicht erfüllt ○

3.2.5 Zusammenfassung von Defiziten und Anforderungen

Das Verweilen in einer Pfadabhängigkeit aufgrund von Gewohnheit oder Erfolgsverwöhntheit gilt es insbesondere beim Technologieeinsatz zu vermeiden (Spath, Warschat 2008). Die Wahl der zu einer Anwendung passenden Technologie ist für Unternehmen daher von **entscheidender Bedeutung**. Soll in diesem Zusammenhang eine Einsparung von Ressourcen erzielt werden, bieten insbesondere emergente Technologien ein großes Potenzial (Neugebauer et al. 2008, Rohn et al. 2008).

Zur praktischen Umsetzung von strategischen Technologieentscheidungen auf Unternehmensebene werden Methoden der **Technologiebewertung** benötigt, die die technologi-

schen Alternativen erkennen und ganzheitlich nach funktionalen, ressourceneffizienzbezogen und ökonomischen Maßgaben integriert bewerten helfen (vgl. Kap. 3.2.2). Resultierende Ergebnisse müssen dann etwa im Rahmen einer Produktentwicklung in unternehmerische Entscheidungsprozesse integriert werden.

Vorhandene **nutzenorientierte Methoden** der Technologiebewertung fokussieren meist auf technisch-funktionale und / oder ökonomische Bewertungsdimensionen. Einige berücksichtigen zwar in erweiterten Varianten durchaus Aspekte der Nachhaltigkeit oder Umweltwirkung, größtenteils jedoch nur als zusätzliche Kriterien. Explizit ressourceneffizienzbezogene Aspekte werden hingegen nicht methodisch berücksichtigt. Hierfür fehlen Zugänge, die die Komplexität und Querschnittscharakteristik des Konzeptes der Ressourceneffizienz (speziell des Lebenszyklusgedankens) berücksichtigen und erschließen können. Dies gilt insbesondere für die Betrachtung emergenter Technologien. Darüber hinaus eignen sich nicht alle diskutierten Methoden für die Bewertung technologischer Alternativen im Rahmen einer Produktweiterentwicklung.

Die existierenden **ressourceneffizienzorientierten Methoden** der Technologiebewertung erlauben eine Bewertung nach ökologischen Aspekten. Ein Großteil dieser Methoden wie die Ökobilanz analysieren die lebenszyklusweiten Umweltwirkungen (z. B. Toxizität) einer Technologie. Anspruch ist dabei eine möglichst umfassende Analyse dieser Auswirkungen oder - im Falle der Lebenszykluskostenanalyse - der Kosten zu gewährleisten. Dies erfordert entsprechend komplexe und aufwändige planerische Ansätze (vgl. Feifel 2009). Mit dem hohen Aufwand geht auch eine mangelnde Flexibilität für die Anpassung an spezielle Fragestellungen einher. Aufgrund der retrospektivischen Ausrichtung sind diese Ansätze meist wenig chancenorientiert und nicht für die Steuerung von Entwicklungs- und Entscheidungsprozessen geeignet. Sie sind weiterhin nicht individuell anzupassen, berücksichtigen keine Markt- bzw. Kostenaspekte und sind somit letztendlich nicht auf die Bedürfnisse von Unternehmen ausgerichtet (vgl. Eversheim et al. 2010). Kurzbilanzierungsmethoden wie MIPS eignen sich hingegen eher für unternehmerische Bewertungsprozesse, da sie einen vergleichsweise geringeren Aufwand und weniger Vorwissen erfordern (Oberender 2006).

Insgesamt ist vor allem keine ausreichende methodische Unterstützung vorhanden, die eine ganzheitliche und gleichzeitig aufwandsreduzierte Bewertung von emergenten Technologien erlaubt. Tab. 3 fasst die Defizite der nutzen- und ressourceneffizienzorientierten Technologiebewertung zusammen und stellt die Anforderungen aus Sicht dieser Arbeit gegenüber.

Tab. 3: Defizite und Anforderungen der nutzen- und ressourceneffizienzbezogenen Technologiebewertung

Defizite	Anforderungen
Die vorhandenen nutzenorientierten Methoden der Technologiebewertung sind nicht für die Anforderungen aus der Komplexität emergenter Technologien und Querschnittscharakteristik des Konzeptes der Ressourceneffizienz ausgelegt.	Zur Berücksichtigung ressourceneffizienzbezogener Aspekte bei der Bewertung emergenter Technologien muss ein systematischer Zugang zum Konzept der Ressourceneffizienz geschaffen werden.
Die vorhandenen ressourceneffizienzorientierten Methoden der Technologiebewertung sind wenig unternehmensgerecht. Diese sind meist aufwändig in der Durchführung, berücksichtigen nicht explizit ressourceneffizienzbezogene Aspekte, haben meist eine retrospektivische Ausrichtung und sind daher nicht entscheidungsorientiert.	Die prospektivische unternehmensnahe ressourceneffizienzbezogene Technologiebewertung muss in vorhandene Entscheidungsprozesse wie die Produktentwicklung integrierbar und kombinierbar sein.
Die vorhandenen Methoden der Technologiebewertung erlauben insgesamt keine ausreichende Unterstützung bei der integrierten technisch-funktionalen, ressourceneffizienzbezogenen und ökonomischen (ganzheitlichen) Bewertung von Technologien.	Ganzheitliche Methoden der Technologiebewertung müssen lebenszyklusbezogen technisch-funktionale, ressourceneffizienzbezogene und ökonomische Aspekte integriert berücksichtigen.

3.3 Ressourceneffizienzorientierte Produktweiterentwicklung

3.3.1 Technisches Produktverständnis

Produkte sind Wirtschaftsgüter, die unter Beachtung diverser Nebenbedingungen in einem wertschöpfenden Prozess – der Produktentwicklung – geschaffen werden. In dieser Arbeit stehen industrielle **Investitionsgüter des Maschinen- und Anlagenbaus** als Produkte im Fokus, die in der Nutzungsphase, also in der Produktionsumgebung beim Anwender, ein relevantes Maß an Ressourcen wie etwa Energie oder Betriebsstoffe benötigen, und daher auch besondere Ressourceneinsparpotenziale bieten (Neugebauer et al. 2008).

Produkte können als das Ergebnis der Anwendung von bestimmten Technologien zur Erfüllung gewünschter Funktionen bzw. Ausführung einer nutzenbringenden Dienstleistung verstanden werden (Hinterhuber 1982). Um sie als technische Systeme abstrakt fassen zu können, ist eine Beschreibung anhand von Funktionen üblich, die mittels Dekomposition geleistet werden kann. Diese Sicht- und Beschreibungsweise eines Produktes kann im Rahmen der Produktentwicklung eine spätere Zuordnung von neuen technologischen Lösungen erleichtern (Pahl et al. 2005).

3.3.1.1 Technische Systeme

Produkte sind in der Konstruktionslehre Gebilde (Anlagen, Apparate, Maschinen, Geräte und Baugruppen), die als Systeme aus einer Gesamtheit geordneter und – aufgrund ihrer Eigenschaften und Attribute – miteinander durch Beziehung verknüpfter Elemente bestehen. Dabei sind diese wiederum Bestandteil eines übergeordneten Systems (vgl. auch Begriff Produktsystem in Kap. 3.1.4.2). Abstrahiert dienen Produkte einem Prozess, in dem Energie, Stoffe und Signale geleitet und / oder verändert werden (vgl. Abb. 9).

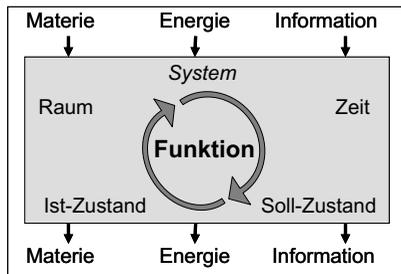


Abb. 9: Produkt als System mit Attributen bzgl. der Umgebung und der Funktion als Transformation des Systems von einem Ist-Zustand in einen Soll-Zustand (nach Pahl et al. 2005)

Zusammenhänge, die zwischen Eingang und Ausgang eines Systems zur Erfüllung einer Aufgabe bestehen, werden als **Funktion** bezeichnet.

Neben der Konstruktionslehre kommt dem Begriff der Funktion auch im Technologiemanagement eine gewichtige Bedeutung zu, da hierdurch das vermittelnde Element zwischen der Ziel-Mittelkombination Produkt und Technologie sowie der Übergang zwischen Market-Pull und Technology-Push beschrieben werden kann (vgl. Spath, Warschat 2008). Ein Denken in Funktionen dient somit der Übersetzung zwischen Bedarfs- und Lösungskontexten. Bestimmung der Funktion ist die Formulierung der Aufgabe auf einer abstrakten und lösungsneutralen Ebene. Dazu werden diese mittels Funktionsanalyse bis auf elementare Grundoperationen zurückgeführt.

3.3.1.2 Dekomposition von Produkten

Die technische Dekomposition spielt bei der **Aufgliederung von Produkten in Teilaspekte** und der damit verbundenen Komplexitätsreduktion eine grundlegende Rolle (Ulrich, Eppinger 2008). Die Anzahl und Art der zu definierenden Ebenen (z. B. Modul und Komponente) kann je nach Ziel, Problemstellung und Komplexitätsgrad der Dekomposition frei gewählt werden, die Übersichtlichkeit des Modells muss jedoch gewahrt bleiben (Gerybadze 2004).

Die **Funktionsanalyse** nach VDI-Richtlinie 2803 bietet eine Methode zur Analyse der Funktionsstruktur von Produkten und ist zentrales Modul der Wertanalyse. Die Abstraktion und Dekomposition ermöglicht während des Konzipierens (vgl. Kap. 3.3.2.1) eine lösungsneutrale Beschreibung des Produktes auf funktionaler Ebene und damit letztendlich neue bzw. alternative technische Lösungsprinzipien (VDI 1996). Die Funktionen werden dabei als Wirkungen definiert und durch ein Substantiv und ein Verb im Infinitiv gebildet (z. B. Flüssigkeit fördern). Diese können nun in Gesamt-, Haupt-, Teil- und Elementarfunktionen gegliedert und Funktionselementen zugeordnet werden.⁸² Funktionselemente können Haupt- und Teilkomponenten oder auch Materialien darstellen. Um diese Zusammenhänge abzubilden, wird die Funktionsstruktur wie etwa ein Funktionsbaum benutzt (vgl. Abb. 16 in Kap. 5.2.2.1).

Die entstandene abstrahierte Darstellungsweise soll die Erarbeitung **passender technologischer Lösungen** ermöglichen (VDI 1996, Akiyama 1994, Birkhofer 2000). Dafür müssen den Funktionen physikalische Effekte sowie geometrische und stoffliche Merkmale (Wirkprinzipien) gegenüber gestellt werden (Pahl et al. 2005). Wirkprinzipien wiederum werden durch sogenannte Lösungsprinzipien dargestellt, die zusammen die Gesamtaufgabe des Produktes erfüllen (VDI 1996). *Lösungsprinzipien werden in dieser Arbeit als technische Möglichkeiten zur Erfüllung einer Funktion (und damit im weiteren Sinn als technologische Lösungen bzw. Technologien) verstanden.* Für die Unterstützung bei der Suche nach neuen Lösungsprinzipien werden häufig Konstruktionskataloge, Checklisten oder Leitlinien verwendet (vgl. VDI 2000). Diese helfen z. B. auch bei der Bereitstellung von umweltbezogenen Daten oder Fragestellungen wie Recyclinggerechtigkeit. Die Umsetzung des Konzeptes der Ressourceneffizienz wird bisher allerdings nicht in dieser Form komplett unterstützt.

3.3.2 Produktentwicklung und Ressourceneffizienz

Die Produktentwicklung bezeichnet das Gestalten eines hinsichtlich der Marktbedürfnisse geeigneten Produktes (Specht, Möhrle 2002). In den letzten Jahren wächst der Bedarf, dies bei einem lebenszyklusweiten minimierten Verbrauch natürlicher Ressourcen und unter Ausschluss toxischer Substanzen zu erreichen (vgl. Abele et al. 2008, Herrmann 2010, Seliger 2007). Im Folgenden werden die grundlegenden Aufgaben der Produktentwicklung und die Motivation einer Orientierung an Ressourceneffizienz vorgestellt.

3.3.2.1 Aufgaben der Produktentwicklung

Die **Aufgaben** der Produktentwicklung umfassen die Gestaltung der Umsetzung einer Idee vom Herstellungsprozess bis zum verkaufsfähigen Erzeugnis – dem Produkt. Dabei gilt es, neben den treibenden Größen Qualität, Kosten und Zeit auch spezielle Produkthanforderungen zu berücksichtigen, die in ästhetische (z. B. Geometrie) und auf den Prozess bezogene Anforderungen (z. B. Fertigbarkeit) unterteilt werden können (Leemhuis 2005). Ziel bei dieser Gestaltung ist letztendlich die Maximierung des Nutzens, der aus dem Gebrauch des Produktes resultieren soll (vgl. Oberender 2006). Produktentwicklung wird als wesentlicher organisatorischer Teil des Produktlebenszyklus gesehen, der nach der Nutzung beim Recycling oder sonstiger Entsorgungsart endet. Sie beeinflusst ausgehend von zunächst

⁸² Bei der VDI 2803 spielt der Abstraktionsgrad eine zentrale Rolle, hieraus ergibt sich die gewünschte Tiefe der Funktionenanalyse und somit die Funktionenstruktur (VDI 1996).

zahlreichen Freiheitsgraden die Funktionalität und den Preis eines Produktes, aber auch die Auswahl von Werkstoffen und Fertigungsverfahren vor Beginn des eigentlichen Produktionsprozesses und des weiteren Produktlebens (vgl. Specht, Möhrle 2002, Pahl et al. 2005). Damit hat sie direkte Auswirkungen auf die in dem Produkt verwendeten Technologien und die ressourceneffizienzrelevanten Parameter, wie im nächsten Kap. ausgeführt wird (Specht, Möhrle 2002).

Der **Produktentwicklungsaufwand** ist von dem Neuigkeitsgrad des Objekts abhängig. So müssen für ein völlig neues Produkt alle Produktentwicklungsphasen durchlaufen werden: Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten. Dabei werden neue Aufgabenstellungen und Probleme mit neuen Lösungsprinzipien erfüllt. Diese können sich entweder durch Auswahl und Kombination aus an sich bekannten Technologien ergeben, oder es muss technisches Neuland – etwa bei emergenten Technologien (vgl. Kap. 3.2.1.1) – betreten werden (Pahl et al. 2005). Handelt es sich um die Modifikation bereits bestehender Produktlösungen, so sind nicht alle Phasen (bzw. in geringerer Ausprägung) zu durchlaufen, da wesentliche Parameter bereits festgelegt sind (Specht, Möhrle 2002). Beispielsweise entfällt hier das Konzipieren mit der Aufgabe der Funktionsfindung. In diesem Fall kann man von Produktweiterentwicklung als eine verkürzte Form der Produktentwicklung sprechen.

Die **Produktweiterentwicklung** dient damit dem Anpassen eines bekannten Produktes an eine veränderte Aufgabenstellung (Anpassungskonstruktion) zur Überwindung offenbar gewordener Grenzen. Eine solche wäre etwa die Kundenforderung einer energiesparsameren Leistung (vgl. Mild 2002). Die ursprüngliche Gesamtfunktion des Produktes wird dadurch nur in unwesentlichen Teilen verändert oder ergänzt. Diese Aufgabe ist ein in der Praxis häufig auftretender Fall, womit der Produktweiterentwicklung eine entsprechend zentrale Bedeutung zukommt (vgl. Wiendahl 2008).

Aufgrund der meist umfangreich vorhandenen Erfahrungswerte in Unternehmen können naheliegende Optimierungspotenziale mit der Produktweiterentwicklung relativ kostengünstig umgesetzt werden. Allerdings ist der **Handlungsspielraum** bei Weiterentwicklungen durch das bereits festgelegte Konzept meist auf inkrementelle Ansätze eingeschränkt (Ehrlenspiel 2007). Das in Neuentwicklungen erschließbare strategische Potenzial durch Funktions- und Systeminnovationen kann bei der Weiterentwicklung häufig nicht in dem gleichen Maße umgesetzt werden. Allerdings sind bei Neuentwicklungen die Fragestellungen auch weniger konkret, da viele Parameter und damit auch mögliche Ressourceneffizienzpotenziale noch unbekannt sind. *Fokus dieser Arbeit ist aufgrund des vergleichsweise leicht zu erschließenden Potenzials die Weiterentwicklung von bestehenden Produkten.*

3.3.2.2 Integration der Ressourceneffizienz

Die Analyse der **Umweltlasten** der einzelnen Stufen eines Produktlebenslaufes zeigt einen charakteristischen Verlauf (vgl. Abb. 10). Während in der Produktentwicklung schon ein Großteil der produktspezifischen Umweltlasten (durchschnittlich 70 %) festgelegt wird, erfolgt deren tatsächliches Auftreten im Allgemeinen erst in den nachgelagerten Bereichen des Produktlebens (vgl. Atik 2001, Schimmelpfeng 1999). Dies gilt insbesondere für sogenannte *aktive* Produkte, zu denen auch die meisten Investitionsgüter gehören. Bei diesen ist die Umweltbelastung bzw. die Ressourcenbeanspruchung (z. B. Energieverbrauch) während der Nutzungsphase vergleichsweise groß (vgl. Reid, Miedzinski 2008, Schimmelpfeng 1999). Bei *passiven* Produkten die keine Energieversorgung benötigen, ist die Nutzungsphase in dieser Hinsicht hingegen weniger relevant.

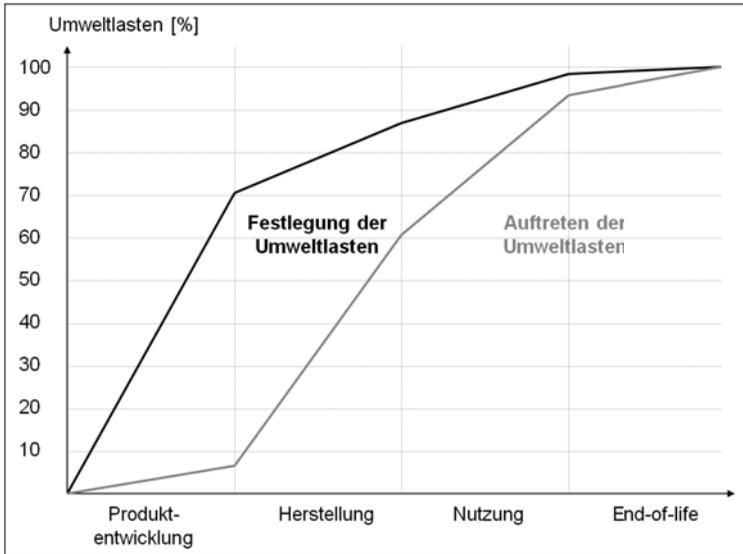


Abb. 10: Umweltlasten eines Produktes (nach Rebitzera et al. 2003)

Wie im vorherigen Kap. bereits erwähnt und aus Abb. 10 ersichtlich, ist die **Einflussnahme** auf die Umweltwirkung bzw. Ressourceneffizienz der Produkte in frühen Lebenszyklusphasen wie der Produktentwicklung vergleichsweise hoch. Gilt es also, Ressourceneffizienzpotenziale in den Produktlebensphasen der Entstehung, Nutzung und Entsorgung aufwandsreduziert zu erschließen, so hat dies frühzeitig schon während der Entwicklung zu erfolgen (Abele et al. 2008, Bullinger et al. 2000, Seliger 2007). Aufgrund dieser bekannten Hebelwirkung der Produktentwicklung haben ökologische Anforderungen wie Recyclinggerechtigkeit als ergänzende Module in einigen etablierten Produktentwicklungsmethoden schon seit längerer Zeit Einzug gehalten.⁸³ Die grundsätzliche Herausforderung hängt dabei allerdings mit der Tatsache zusammen, dass während der Produktentwicklung die Vorhersagequalität von Wirkungen aufgrund der geringen Systemkenntnis im Vergleich zu späteren Phasen relativ gering und die Datenerhebung daher häufig anspruchsvoll ist (vgl. Lang-Koetz et al. 2006, Abele et al. 2008).

Für eine umfassende Ressourceneffizienzorientierung sind nicht nur ökologische Teilaspekte wie beispielsweise die Recyclingfähigkeit zu betrachten. Vielmehr ist die ressourceneffizienzorientierte Produktentwicklung im Sinne einer fundierten Betrachtung ökologischer Aspekte in einem Bewertungskontext zu verstehen, welche eine umfassende Sicht auf das Produkt erlaubt. Dies betrifft in erster Linie die Beachtung des kompletten technischen⁸⁴ **Lebenszyklus** des Produktes.⁸⁵ Dieser lässt sich in mehrere Phasen einteilen: Er beginnt mit der Rohstoffgewinnung, welcher die Herstellung und die Nutzung folgen und mündet in einer

⁸³ Beispielsweise werden ökologische Anforderungen in der Konstruktionslehre von PHAL-BEITZ durch Regeln zur recyclinggerechten Produktgestaltung, Werkstoffverträglichkeitsmatrizen und Beispiele für demontagegerechte Baustrukturen und Fügstellen berücksichtigt (vgl. Pahl et al. 2005, Hermenau, Udo 2008).

⁸⁴ Die betriebswirtschaftliche Lebenszyklusbetrachtung eines Produktes – mit der Marktphase im Mittelpunkt – wird in dieser Arbeit nicht herangezogen (vgl. Eversheim, Schuh 1996).

⁸⁵ Vgl. hierzu Schimmelpfeng 1999, Birkhofer 2000, Reid, Miedzinski 2008.

der Wirtschaftstätigkeit nachgelagerten End-of-life Phase des Recyclings (z. B. zur Gewinnung von Sekundärmaterialien) bzw. der Entsorgung als Abfall (vgl. Seliger 2007, Eversheim, Schuh 1996). Hinter diesem Prinzip des Lebenszyklus-Gedankens verbirgt sich das Wissen um die potenziellen negativen ökologischen Folgen der Verwendung von Ressourcen über den gesamten Lebenszyklus hinweg.⁸⁶ Hierzu gehört auch das Bewusstsein um die Möglichkeit einer „Verschleppung“ negativer Effekte (vgl. Begriff „Rebound-Effekte“ in Kap. 3.2.1.3), entlang des Lebenszyklusses. Damit verbunden ist die zunehmend eingeforderte erweiterte Produktverantwortung des Herstellers (vgl. Kap. 3.1.3.1).

Dieser umweltorientierten Sichtweise folgend, *beschreibt die ressourceneffizienzorientierte Produktweiterentwicklung die Anpassung eines bekannten Produktes zur lebenszyklusorientierten effizienteren Nutzung von Ressourcen* (vgl. Hermenau 2008).

Als **Herausforderung** bei der lebenszyklusweiten Betrachtung erweist sich der Umgang mit Zielkonflikten, die sich etwa aus dem Abgleich mit technischen Erfordernissen oder Markt- und Kostenaspekten ergeben können (Abele et al. 2008, Ruud, Larsen 2003). Bei isolierter Betrachtung besteht die Gefahr, dass durch Einzelmaßnahmen suboptimale Zustände angestrebt werden und ein Gesamtoptimum im Lebenszyklus verfehlt wird (Herrmann 2010). Daher gilt es, neben ressourceneffizienzbezogenen und technisch-funktionalen Aspekten insbesondere marktliche und regulative Anforderungen (z. B. Zulassung) frühzeitig für eine ganzheitliche Betrachtung (vgl. Kap. 3.2.2) zu berücksichtigen (Rohn et al. 2008).⁸⁷ Je komplexer das Produkt ist, beispielsweise durch Integrierung mehr Komponenten, desto wichtiger ist dabei die Berücksichtigung des gesamten Produktsystems (vgl. Kap. 3.1.4.2). Hiermit kann auch eine organisatorische Anpassung⁸⁸ verbunden sein (Reid, Miedzinski 2008). Idealerweise müssen über kooperierende Aktivitäten alle Anforderungen berücksichtigt werden, um unerwünschte Folgen in späteren Lebensphasen verhindern zu können.⁸⁹

Gilt es für Unternehmen, Ressourceneffizienz in die Produktentwicklung zu integrieren, ist es daher erforderlich, die genannten Aspekte und Anforderungen proaktiv aufzugreifen (vgl. Schäppi et al. 2005). Dabei ist speziell die besondere Berücksichtigung der **Nutzungsphase** von entscheidender Bedeutung, da sich dort letztendlich der erreichte Nutzen für den Anwender bestimmt und – wie bereits erwähnt – häufig die meisten Ressourcen verbraucht werden. Dieser Vorteil kann anwendenden Kunden vermittelt und vom Hersteller auch erworben werden, evtl. zukünftig unterstützt durch entsprechende Kennzeichnungen auf Typenschildern oder Labels sowie nachweisbare Konformität mit Effizienzklassen (vgl. VDMA, Roland Berger 2009, Erhard, Pastewski 2010).⁹⁰ Dies gilt im Besonderen für dauerhafte Investitionsgüter, da bei diesen eine langjährige und kostengünstige (z. B. wartungsarm, verbrauchsreduziert) Nutzung erstrebenswert ist (Westkämper 1999).

⁸⁶ Daher wird der Lebenszyklusgedanke vielfach auch als „Wiege-zur-Bahre- bzw. „Wiege zur Wiege“-Ansatz bezeichnet, der für ein radikales Umdenken in dem Gestalten von Produkten steht (McDonough, Braungart 2002).

⁸⁷ Die ganzheitliche Betrachtung ist auch deshalb wesentlich, da vordergründig der Einsatz einer neuen Technologie oft mit höheren Kosten verbunden sein kann. Der Nutzenvorteil zeigt sich hingegen meist erst in einer detaillierteren Analyse (vgl. Life Cycle Costing in Kap. 3.2.3.2.1).

⁸⁸ Neue technologische Lösungen können z. B. neue Bedienungen / Steuerungen des Produktes oder zusätzliche Kompetenzen seitens des Personals erfordern.

⁸⁹ Hierbei erschweren oft die räumliche, organisatorische und zeitliche Trennung der beteiligten Akteure die benötigten Informationsströme (Herrmann 2010).

⁹⁰ Es ist zu erwarten, dass zukünftig auch für Investitionsgüter entsprechende Kennzeichnungsanforderungen – z. B. – zum Energieverbrauch Verbreitung finden (vgl. Kap. 3.1.3.1). Maßgeblich ist hier die EU-Richtlinie zur Energieverbrauchskennzeichnung (Europäischer Rat 1992).

3.3.3 Ansätze der Produktweiterentwicklung

Zur Bestimmung möglicher Auswirkungen von denkbaren Lösungsalternativen auf das Produktleben sind Produktentwickler sowohl auf ihr Produktwissen als auch auf unterstützende Methoden angewiesen (Lindow et al. 2009). Im Rahmen der umweltorientierten Produktentwicklung sind in der Vergangenheit vielfältige **Ansätze** und Erweiterungen bestehender Ansätze entwickelt worden (vgl. auch Ausführungen zu Managementmethoden in Kap. 3.1.4.1).

In diesem Kap. werden das Design to X und TRIZ beschrieben. Design to X bietet einen geeigneten methodischen Rahmen, um besondere Anforderungen in die Produktweiterentwicklung zu integrieren. TRIZ unterstützt als abstrahierendes Modell den Prozess einer kreativen Lösungsfindung in einer allgemeingültigen und aufwandsreduzierten Weise. Weitere Ansätze wie das Vorgehen zur Produktentwicklung nach VDI 2221, das Ökodesign und vorhandene Ansätze für Innovationsprozesse sind in Tab. 33 des Anhangs (Kap. 10.1.3) aufgeführt. Sie alle werden z. T. seit vielen Jahren im Rahmen der Entwicklung neuer technologischer Lösungen für existierende Produkte eingesetzt und haben daher ihre Tauglichkeit in der praktischen Anwendung bewiesen. Neben der Beschreibung werden die Ansätze in Bezug auf die eingangs formulierte Zielsetzung (Kap. 2.1) und Problemstellung (Kap. 3.1.5) kritisch gewürdigt. Hieraus folgt, dass auf Basis von nutzungsphasenbezogenen Ressourcenverbrauchspotenzialen im Produkt passende alternative Lösungsprinzipien aufwandsreduziert zu erarbeiten sind.

3.3.3.1 Ansätze für bestimmte Anforderungen (Design to X)

Da sich Zielstellungen und Anforderungen an Produkte ändern, gilt es, Produkte hieran anzupassen und ggf. neu zu „interpretieren“. Dabei können nicht funktionsrelevante Anforderungen wie beispielsweise Kosten oder Ressourceneffizienz relevant werden, die alternative Lösungsprinzipien des Produktes erfordern (Ehrlenspiel 2007). Das Design for Recycling zielt etwa darauf ab, bereits im Produktentwicklungsprozess wesentliche Stellhebel für eine umweltverträgliche und materialeffiziente Verwertung bzw. Entsorgung des Produktes zu betätigen.⁹¹

Generell lassen die im Umfeld des Design to X verwendeten Optimierungsansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz wie die Lebensdauerverlängerung gemeinsame Prinzipien erkennen (vgl. auch Kap. 3.1.4.2 und 4.1.1).⁹² Welche der Optimierungsansätze in der konkreten Anwendung zielführend sind, ist fallweise zu entscheiden. Maßgeblich sind der Charakter des Analysegegenstandes, relevante Lebenszyklusphasen, spezifische technisch-funktionale, ressourceneffizienzbezogene und ökonomische Zielstellungen sowie sonstige Randbedingungen.

Das Vorgehen bei der Weiterentwicklung eines existierenden Produktes nach einer Hauptforderung (Design to X nach EHRENSPIEL) ist an existierende Vorgehensweisen angelehnt, muss allerdings an produkt- und betriebsspezifische Eigenheiten angepasst werden (Ehrlenspiel 2007). Meist wird mit einer Phase der kreativen Klärung der Aufgabe und des Vorgehens begonnen. Dabei wird zunächst geklärt, wo die wesentlichen Forderungen, Schwachstellen, Potenziale liegen und welche konstruktiven Freiräume bestehen. In der Phase der Lösungssuche werden erste Lösungsideen und mögliche Potenziale sowie Ein-

⁹¹ Hauptansatzpunkte des Designs for Recycling sind die folgenden (Jörissen et al. 2008): Auswahl kreislauffähiger Werkstoffe und Werkstoffpaarungen, Vermeidung von Materialien, die toxische Eigenschaften aufweisen oder deren Gewinnung mit einem hohen technischen Aufwand verbunden ist, Vermeidung schwer trennbarer Verbunde (z. B. Metall-Kunststoff) und Reduzierung der Materialvielfalt, Demontagegerechte Baustruktur (z. B. modularer Aufbau) und Verwendung lösbarer Verbindungstechniken und die Kennzeichnung von Bauteilen und Werkstoffen hinsichtlich deren Funktion sowie deren Wertstoff- bzw. Gefährdungspotenzial.

⁹² Beispielhaft für existierende Zusammenstellung solcher Ansätze seien hier folgende genannt: Brezet, van Hemel 1997, Jörissen et al. 2008, Ruud, Larsen 2003, Pastewski et al. 2009; Birkhofer 2000, Wimmer 2004.

flussgrößen ermittelt. Anschließend kann die Brauchbarkeit der neuen Lösungsvorschläge analysiert werden (Lösungen auswählen). Schließlich wird das weitere Vorgehen strukturiert.

Das Vorgehen eignet sich mit der **praxisgerechten Ausrichtung für die Weiterentwicklung von Produkten** entsprechend bestimmter Optimierungsziele wie etwa Ressourceneffizienz als methodischer Rahmengeber. Darüber hinaus existieren aber keine im Sinne der Aufgabenstellung nutzbare Konzepte, die die Lösungssuche im Bereich emergenter Technologien unterstützen. Ebenso wird keine ganzheitliche Bewertung nach Funktionalität, Ressourceneffizienz und Ökonomie unterstützt, um daraus passende alternative Lösungsprinzipien zur Optimierung der Produktnutzungsphase ableiten zu können.

3.3.3.2 TRIZ als kreativer Problemlösungsprozess

Das Akronym TRIZ steht für „Theorie des erfinderischen Problemlösens“. Die Methodik wurde von ALTSCHULLER entwickelt, um technische Probleme systematisch zu lösen. TRIZ umfasst eine Vielzahl an Methoden und Werkzeugen, die eine schnelle und systematische Lösungssuche etwa im Rahmen einer Produktentwicklung unterstützen. Die bekannteste Technik ist die Widerspruchsmatrix. Sie folgt Altschullers Leitgedanken, dass das Erkennen und Lösen von Widersprüchen die Grundlage des innovativen Entwickelns darstellt (Altschuller 1973). Demnach soll das Problem möglichst ähnlich zu einem Standardproblem formuliert werden, um dann bekannte Standardlösungen dieses Standardproblems auf das spezielle Problem beziehen zu können (vgl. Abb. 12 in Kap. 4.1.3). Auf diesem Weg kann ein besonders effizientes Problemlösen erzielt werden. Die direkte Ableitung von einem spezifischen Problem zu einer spezifischen Lösung, z. B. mittels Brainstorming, ist meist weniger erfolgversprechend (Herb et al. 2000, Bannert 2007).

Die Anwendung dieses Ansatzes erfolgt in vier Schritten. Zuerst wird das spezifische Problem erfasst. Hierbei wird das konkrete Problem beschrieben, Ziele abgeleitet und das zu verbessernde System definiert. Im zweiten Schritt wird das konkrete Problem durch Abstraktion auf ein Standardproblem überführt. Dabei ist es das Ziel, die Problemsituation in Form eines binären Widerspruchs zu formulieren. Zur Beschreibung des Widerspruchs stehen 39 verschiedene technische Widerspruchsmerkmale (Parameter) zur Verfügung. Anschließend erfolgt die Identifikation geeigneter Standardlösungen für die Auflösung des beschriebenen Widerspruchs.⁹³ Im letzten Schritt werden schließlich die ausgewählten Grundprinzipien auf das Bezugssystem angewendet.

Grundsätzlich zeichnet sich die TRIZ-Methodik dadurch aus, dass das **systematische Vorgehen**, die Identifikation standardisierter Lösungen ermöglicht. Allerdings beruhen diese Lösungsvorschläge auf der Patentanalyse von Altschuller – mögliche neue ressourceneffizienzorientierte Lösungsansätze durch emergente Technologien sind somit sowohl methodisch wie inhaltlich unberücksichtigt. Eine vollständige Identifikation und Bewertung dieser Lösungspotenziale wird dadurch nicht erreicht, weil die Ansätze zur Lösung von Widersprüchen und die physikalischen Grundeffekte zu allgemein formuliert sind. Hier fehlt ein Modell, welches Ressourceneffizienz in den Problemlösungsprozess integriert. Dieser Zusammenhang gilt auch für die TRIZ-Ansätze des Ökodesigns⁹⁴, deren Zusammenstellungen von

⁹³ Ein technischer Widerspruch lässt sich für gewöhnlich durch 40 Grundprinzipien auflösen. Sie stellen allgemeine Lösungsmuster dar, die in unterschiedlichen Themenfeldern zur Lösung von technischen Widersprüchen geführt haben (Klein 2007). Welche der 40 Grundprinzipien für die Lösung des formulierten Widerspruchs geeignet sind, wird mittels der Widerspruchsmatrix (39x39 Matrix) bestimmt.

⁹⁴ Aufgrund der Möglichkeit mittels TRIZ technische Probleme, speziell Konflikte systematisch lösen zu können, sind in der Literatur auch verschiedene Ansätze zur Anwendung von TRIZ für das Ökodesign (vgl. Tab. 34 im Anhang, Kap. 10.1.3) vorhanden (Chang, Chen 2004). LIU und CHEN haben in ihren Arbeiten die Verknüpfbarkeit von allgemeinen Prinzipien der Ökoeffizienz und den 39 TRIZ -Parametern untersucht und mittels Fallstudien bei Konsumgütern zeigen können (Chen, Liu 2003). Auf dieser Grundlage wurde ein Ökodesign-Prozess mittels Ökoeffizienzprinzipien entwickelt.

Prinzipien nicht immer vollständig nachvollziehbar und so allgemein gehalten sind, dass diese zwar die kreative Ideenfindung unterstützen, aber keine konkreten technologischen Lösungsoptionen ermitteln helfen.

3.3.3.3 Vergleich der beschriebenen Ansätze

Tab. 4 vergleicht die beschriebenen Ansätze mittels Kriterien. Diese leiten sich aus der Zielsetzung (Kap. 2.1) und der Problemstellung (Kap. 3.1.5) der Arbeit ab. Sie adressieren Anforderungen an die Lösungssuche, die Ganzheitlichkeit der Betrachtung, den Anwendungskontext und den Einsatz des Ansatzes.

Tab. 4: Ansätze zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung

Ansätze	Lösungssuche			Ganzheitlichkeit			Anwendungskontext			Einsatz		
	Unterstützung bei der Aufdeckung von Ressourceneffizienzpotenzialen in Investitionsgütern	Berücksichtigung vorhandener ressourceneffizienzbezogener Schwachstellen	Berücksichtigung der Charakteristika emergenter Technologien	Berücksichtigung technischer Anforderungen	Berücksichtigung ressourceneffizienzbezogener Anforderungen	Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher Anforderungen	Technologiestrategie	Prospektive Produktbewertung (ex ante)	Produktweiterentwicklung	Retrospektive Produktbewertung (ex post)	Flexibilität und Kompatibilität	Aufwand
VDI 2221	○	○	○	●	●	●	○	●	●	○	●	●
Design to X	●	●	○	●	●	○	○	●	●	○	●	●
Ökodesign	○	●	○	○	●	○	○	●	●	○	○	●
Ansätze für Innovationsprozesse	●	○	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●
TRIZ	●	○	●	●	●	○	○	●	●	○	●	●

Legende: größtenteils erfüllt ● teilweise erfüllt ○ größtenteils nicht erfüllt ○

3.3.4 Zusammenfassung von Defiziten und Anforderungen

Als Produkte stehen in dieser Arbeit die komplexen industriellen Investitionsgüter des Maschinen- und Anlagenbaus im Fokus. Um diese lebenszyklusweit ressourceneffizient zu gestalten, bietet die **Produktentwicklung weitreichende Möglichkeiten**. Da inkrementelle Innovationen den größten Anteil des Innovationsgeschehens ausmachen – Produkte in der Praxis also meist nicht vollständig *neu*, sondern in der Regel *weiter* entwickelt werden – gilt es speziell bei der Produktweiterentwicklung anzusetzen. Somit können die bei Anlagenherstellern in der Breite vorhandenen Potenziale auf effiziente Weise umgesetzt werden. Die Integration von Ressourceneffizienz muss dabei ganzheitlich (vgl. Kap. 3.2.2) erfolgen und sollte die Nutzenphase im Besonderen berücksichtigen, da diese die größten ökonomischen und ressourceneffizienzbezogenen Potenziale aufbietet. Hierfür sind einige Ansätze in der

Literatur und Praxis vorhanden, die relevante Aspekte jedoch nur unzureichend berücksichtigen.

Klassische Ansätze wie die VDI 2221 berücksichtigen zwar ausgewählte problembehaftete Bereiche der Produktlebenszyklusphasen wie das Recycling, weniger jedoch explizit die Nutzungsphase (vgl. Pahl et al. 2005). Dem Lebenszyklusgedanken wird dabei nicht genügend getan (vgl. Kap. 3.1.1). Insgesamt bieten diese Ansätze meist nur einen groben methodischen Rahmen, den es bedarfsgerecht zu konkretisieren gilt.

Ansätze der **umweltorientierten Produktentwicklung** integrieren erfolgreich Umweltaspekte prospektivisch in den Produktentwicklungsprozess, um mögliche Umweltauswirkungen lebenszyklusweit auf ein Mindestmaß zu reduzieren und sind damit meist problemorientiert. Chancenorientierte Ansätze, die die Potenziale der Ressourceneffizienz bewusst nutzen, sind in diesem Zusammenhang nicht ausreichend vorhanden (Neugebauer et al. 2008). Ein Großteil dieser Methoden wie das Ökodesign dient zudem der Neuentwicklung von Konsumgütern. Eine direkte Übertragbarkeit auf Investitionsgüter ist nicht sinnvoll, da diese oft eine komplexere Produktstruktur aufweisen (VDI 2000). Weiterhin bleibt das naheliegende Potenzial, bekannte Problemfelder bei Produkten (Schwachstellen) als Ansatzpunkte für Ressourceneinsparung zu berücksichtigen, häufig ungenutzt. Dieses Wissen ist im eigenen Unternehmen jedoch meist leicht zugänglich. Insbesondere wird die systematische Integration der weitreichenden Potenziale emergenter Technologien nicht geleistet. Letztendlich muss ein Ansatz auch die Ableitung von konkreten Maßnahmen zur Umsetzung der erarbeiteten alternativen Lösungen erlauben.

Für einige der **kreativen Verfahren zur Lösungssuche** wie TRIZ existieren auch Ansätze zur Berücksichtigung ökologisch motivierter Zielstellungen (vgl. Chen, Liu 2003). Diese greifen aber in frühen Phasen des Innovationsprozesses und sind daher ebenso wie das Ökodesign eher für die Neuentwicklung von Produkten bedeutsam. Auch werden die Lösungspotenziale emergenter Technologien für die kreative Generierung neuer zukunftsgerechter technologischer Lösungsansätze nicht methodisch betrachtet.

In Kap. 3.1.4.2 bzw. Kap. 4.1.1. werden Potenziale zur technischen Umsetzung von Ressourceneffizienz in Produkten vorgestellt. Diese liegen bisher nicht in einer für die Nutzung im Problemlösungsprozess geeigneten Form vor. Existierende Lösungssammlungen oder Konstruktionskataloge bieten nicht die geforderten ressourceneffizienzbezogenen Lösungen (Lösungsprinzipien), sondern dienen eher der allgemeingültigen Informationsbereitstellung (vgl. VDI 2000, Kap. 3.3.2.1). Es fehlt somit ein **Übersetzungsmodell**, mit dem die vorhandenen ressourcenverbrauchsbezogenen Schwachstellen in der Nutzungsphase eines Produktes als Optimierungsansätze so erschlossen werden können, dass mittels umfassender und branchenunabhängiger Lösungsmuster (Ressourceneffizienzpotenziale) eine Brücke zur Identifikation geeigneter emergenter Technologien als alternative Lösungsprinzipien geschlagen werden kann.

Tab. 5 fasst die zu konstatierenden Defizite der ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung zusammen und stellt die Anforderungen aus Sicht dieser Arbeit gegenüber.

Tab. 5: Defizite und Anforderungen der ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung

Defizite	Anforderungen
Die etablierten Ansätze der Produktweiterentwicklung berücksichtigen nicht ausreichend die ressourceneffizienzbezogenen Aspekte der Nutzungsphase.	Die Fokussierung auf ressourceneffizienzbezogene Aspekte insbesondere der Nutzungsphase ist in einer entsprechend ausgerichteten Produktweiterentwicklung erforderlich.
Die bestehenden umweltorientierten Ansätze der Produktentwicklung binden nicht methodisch umfassend produktbezogene Erfahrungen und bekannte Problemfelder ein.	Die systematische Nutzung von produktbezogenen Erfahrungen und bekannten Problemfeldern muss für die ressourceneffizienzorientierte Produktweiterentwicklung methodisch ermöglicht werden.
Die kreative Generierung neuer Lösungen mit Ressourceneffizienzpotenzial aus dem Bereich emergenter Technologien wird für Investitionsgüter bei bestehenden Ansätzen der Produktweiterentwicklung nicht methodisch unterstützt.	Für die ressourceneffizienzorientierte Produktweiterentwicklung von Investitionsgütern ist die integrierte methodische Unterstützung der kreativen Generierung neuer spezifischer technologischer Lösungskonzepte auf Basis emergenter Technologien erforderlich.
Die technische Umsetzung von Ressourceneffizienz in Produkten mittels emergenter Technologien ist für Hersteller unklar, da eine formalisierte Beschreibungsgrundlage fehlt.	Es ist eine umfassende und branchenunabhängige Beschreibung geeigneter Optimierungsansätze und Ressourceneffizienzpotenziale als Grundlage für die ressourceneffizienzorientierte Produktweiterentwicklung erforderlich.

3.4 Zusammenführung der Defizite

Die **Problemstellung** für diese Arbeit wurde in Kap. 3.1.5 als die fehlende Unterstützung der adressierten Unternehmen, also der Hersteller von industriellen Investitionsgütern, bei der technologischen Umsetzung des Konzepts der Ressourceneffizienz in deren Produkten zur Erhöhung des ganzheitlichen Nutzens konkretisiert.

In den Kap. 3.2 und 3.3 wurde erläutert, dass weder im Bereich der Technologiebewertung noch bei der Produktweiterentwicklung ein **methodischer Ansatz** existiert, der systematisch auf Basis der vorhandenen ressourcenverbrauchsbezogenen Schwachstellen eines Investitionsgutes des Maschinen- und Anlagenbaus in einer kreativen und praxismgerechten Weise über eine Problembeschreibung und anschließende Lösungssuche alternative technologische Lösungsprinzipien mit Ressourceneffizienzpotenzial für die Nutzungsphase identifiziert und ganzheitlich bewertet (vgl. Tischner 2001, Brahmer-Lohss et al. 2004). Ganzheitlich meint hier die integrierte lebenszyklusbezogene Berücksichtigung funktionaler, ressourceneffizienzbezogener und ökonomischer Anforderungen. Ein solcher Ansatz müsste zudem die Leistungsfähigkeit emergenter Technologien (vgl. Reid, Miedzinski 2008, Bullinger 1994; Day et al. 2000) nutzbar machen, wofür eine bedarfsgerechte Aufbereitung in Form einer eigenen Systematik grundlegend ist (vgl. Rohn et al. 2008).

4 Konzeption eines Verfahrens zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung unter Einsatz emergenter Technologien

Unter Beachtung der in Kap. 2.1 beschriebenen Ziele und der in Kap. 3.4 zusammengefassten Defizite wird im Folgenden ein Verfahren zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung konzipiert. Ziel ist dabei die Erhöhung des ganzheitlichen Nutzens speziell beim Anwender durch die Integration ressourceneffizienzsteigernder emergenter Technologien.

Abb. 11 zeigt den technischen Lebenszyklus eines Produktes sowie den eines Lösungsprinzips (emergente Technologie), die in der Nutzung verschmelzen. Zudem sind die lebenszyklusbezogenen **Bilanzierungsgrenzen** dargestellt. Die primäre Bilanzierungsgrenze wird durch die Nutzungsphase und somit den Einsatz eines Lösungsprinzips im Produkt beim Anwender beschrieben. Diese bildet den Fokus des Verfahrens, da hier die Wirkung eines neuen Lösungsprinzips primär zu Tage tritt. Sekundäre Bilanzierungsgrenzen sind im Sinne der Ganzheitlichkeit (vgl. Kap. 3.2.2) als der Nutzung vorgelagerte und nachgelagerte Phasen des Lösungsprinzips in den einzelnen Bewertungsschritten fallweise von Belang (vgl. Kap. 5.4).

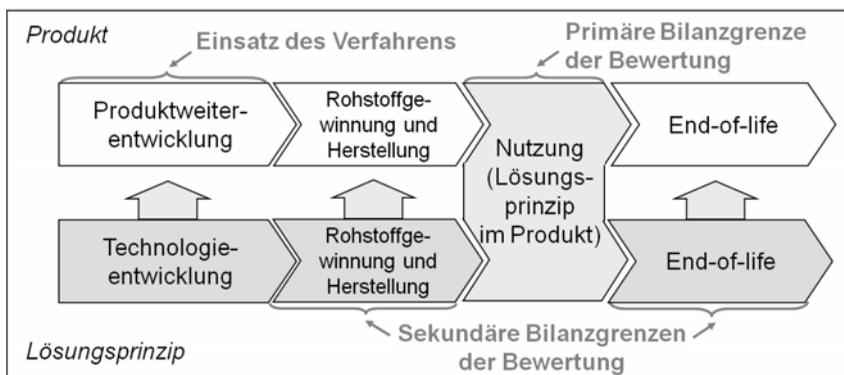


Abb. 11: Bilanzierungsgrenzen der Bewertung im Verfahren

In den **folgenden Abschnitten** werden zunächst ein ressourceneffizienzbezogenes Technologiepotenzialmodell erarbeitet und anschließend die Grundlagen und Anforderungen des Verfahrens beschrieben.

4.1 Ressourceneffizienzbezogenes Technologiepotenzialmodell

Das im Kap. 3.3.4 geforderte formalisierte Analysemodell bildet die Basis für den gesamten Problemlösungsprozess des Verfahrens – zum einen für die *Definition von ressourcenverbrauchsbezogenen Schwachstellen des Produktes in der Nutzungsphase* und zum anderen für die *Identifikation und Bewertung alternativer ressourceneffizienzsteigernder Lösungsprinzipien*.

Modelle sind vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit. Mittels bestimmter Erklärungsgrößen (Modellelemente) wird im Rahmen einer handhabbaren Theorie (Kap. 4.2) eine **Abstraktion**

vorgenommen.⁹⁵ In dem ressourceneffizienzbezogenen Technologiepotenzialmodell werden beobachtbare Größen, nämlich relevante Optimierungsansätze und relevante Potenziale von Technologien, abstrahiert und mittels kausaler Gesetze verknüpft. Diese stellen somit ein Wertesystem auf, in dem der Analysegegenstand (Produkt) bewertet werden kann. Zu leisten ist insbesondere die Beschreibung von Ansätzen und die Definition von möglichen Lösungsbeiträgen emergenter Technologien als parametrisierte Lösungsmuster.

Der Lösungsfindung liegt eine **Analogiebildung** zugrunde. Dabei wird eine Lösung eines Problems aus dem einen Bereich auf ein Problem aus dem anderen Bereich übertragen. Eine Analogie besteht dann, wenn mindestens ein Merkmal eines Analogieobjektes auch Merkmal des Suchobjektes ist.⁹⁶ Darüber hinaus fungiert das Modell als ein Wissensspeicher mit ähnlichen Aufgaben wie Lösungssammlungen (vgl. Kap. 3.3.2.1).

In dem zu entwickelnden Verfahren sollen diese Darstellungen aus dem Modell aufgegriffen werden können, wofür die Definition von **Modellelementen** notwendig ist. Diese werden im Folgenden ausgehend von relevanten produktbezogenen Optimierungsansätzen und technologischen Potenzialdarstellungen erarbeitet. In ihrer Ausprägung entsprechen diese Modellelemente dem heutigen Stand der Erkenntnisse zu prinzipiellen ressourceneffizienzbezogenen Potenzialen von emergenten Technologien.

4.1.1 Relevante Optimierungsansätze zur Steigerung der Ressourceneffizienz in Investitionsgütern

Wie in Kap. 3.1.4 beschrieben, kann die Steigerung der Ressourceneffizienz auf unterschiedlichen Wegen erreicht werden. In dieser Arbeit werden die folgenden Optimierungsansätze⁹⁷ betrachtet, die mittels des Einsatzes bzw. der Anwendung emergenter Technologien in Investitionsgütern umgesetzt werden können und die insbesondere während der Nutzungsphase des Produktes greifen (vgl. Kap. 3.1.4.2).

4.1.1.1 Substitution von Ressourcen

Ziel dieses Optimierungsansatzes ist es, eine knappe bzw. problematische Ressource durch eine andere zu ersetzen, die ein günstigeres Profil aufweist. Dabei können verschiedene Arten von Substitution unterschieden werden (vgl. Ziemann et al. 2010). Hier sind die Materialsubstitution und ggf. die funktionale Substitution (Ersatz einer technologischen Lösung durch eine andere mit derselben Funktion) von Belang. Strategien können etwa sein:

- der Einsatz solcher Ressourcen, wie bestimmte Materialien, die einen geringeren Verbrauch anderer Ressourcen wie Energie ermöglichen (z. B. Leichtbau-, Wärmedämmmaterialien)
- die Vermeidung des Einsatzes seltener und / oder teurer Ressourcen (z. B. bestimmte seltene Metalle wie Platin)
- die Reduktion möglicher negativer Auswirkungen auf die Umwelt bzw. menschliche Gesundheit (z. B. toxische Lösemittel oder CO₂-Emissionen) bzw. die Konformität mit

⁹⁵ Dabei kommen die Merkmale Abbildung, Verkürzung und Pragmatik eines Modell zum Tragen, die eine Erklärung von komplexen Zusammenhängen ermöglichen (Stachowiak 1973, Untiedt 2009).

⁹⁶ Ein bekanntes Beispiel für Analogiebildung ist die Bionik, bei der die Übertragung von Analogien aus dem System der Natur auf die Technik methodisch erarbeitet wird. Analogien können meist nur in einem sehr abstrakten Grad auf das technische Problem übertragen werden. Wesentlich ist bei der Ausarbeitung einer Analogiebildung die Frage nach dem Detaillierungsgrad. Je genauer die Problemstellung definiert werden kann, desto zielgerichteter werden auch die alternativen Lösungen ermittelt. Allerdings werden damit auch die Anzahl der Lösungen sowie die Möglichkeit, tatsächlich neue Ansätze zu erhalten, geringer.

⁹⁷ Diese wurden aus der Kondensation bestehender Zusammenstellungen zu Optimierungsansätzen abgeleitet (vgl. Kap. 3.1.4.2 und Kap. 3.3.3.1).

- verschärften gesetzlichen Vorschriften
- die Vermeidung von sonst aufwändig zu entsorgenden Schadstoffen⁹⁸

4.1.1.2 Steigerung der Effizienz

Bei diesem Optimierungsansatz gilt es, den Einsatz einer Ressource pro Produkteinheit zu reduzieren. Maßgabe kann die optimalere (Aus)nutzung einer Ressource, etwa aufgrund der Kombination von mehreren Funktionen (im Fall von Wasser etwa Transport von Stoffen und Kühlung) im Sinne der Multifunktionalität, sein. Beispielsweise wurde das Vitamin B2 ursprünglich in einer komplexen Synthese hergestellt. Die neue Technologie einer einstufigen Fermentation auf der Basis von Sojaöl führte zu der Einsparung von Syntheseschritten und letztendlich einem geringeren Ressourcenverbrauch (VDI 2008). Konstruktive Maßnahmen im Sinne der Prozessoptimierung hingegen sind in dieser Untersuchung nicht Fokus des Lösungsraums.

4.1.1.3 Minderung von Abfall / Ausschuss

Hierbei ist die Zielstellung die betrachteten Ressourcen so einzusetzen, dass die Entstehung von Abfall bzw. Ausschuss reduziert wird. Strategien können somit die Verringerung des Materialeinsatzes, des Ausschusses (wie Verschnitt), des erzeugten Abfalls oder von Fehlprodukten sein. Beispielsweise kann eine neue thermooptische Technologie zur berührungslosen Prozessüberwachung bei der Fertigung die Ausschussrate mindern (Raether 2006).

4.1.1.4 Verlängerung der Lebensdauer

Zielstellung der Lebensdauerverlängerung von Produkten ist das Ausdehnen der Dauer, während der ein Nutzen aus einem Produkt bzw. dessen Komponenten oder Lösung (z. B. eine Oberflächenbeschichtung) entspringt. **Strategien** können dabei im Einzelfall die folgenden sein (vgl. Becker et al. 2002):

- Sicherstellung eines Schutzes vor äußeren Einflüssen etwa mittels UV-Schutz, Korrosionsschutz oder Verschleißminderung
- Instandhaltungsfreundlichkeit des gesamten Produktes, d. h. vereinfachte Erkennung des Verschleißzustandes und Wartungs- und Inspektionsfreundlichkeit (Bullinger et al. 2009)
- Berücksichtigung von Modernisierungs- und Aufarbeitungsmöglichkeiten, durch Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Anpassungen an neue Anforderungen im betrieblichen Einsatz

Beim Upgrading etwa werden zur Aufwertung des Qualitätsniveaus eines Produktes bestimmte Komponenten gezielt gegen innovative, leistungsfähigere oder effizientere ausgetauscht. Darüber hinaus kann durch ein erweitertes Spektrum an Produktfunktionen die Attraktivität des Produkts erhöht werden.

Die Lebensdauerverlängerung ist eine häufig praktizierte Strategie zur Umsetzung von Ressourceneffizienz im Produkt, deren Mehrwert auch vom Anwender direkter erkennbar ist. **Ökonomisch vorteilhaft** ist diese zudem, wenn etwa aufwändige Rücknahmeforderungen des Gesetzgebers hierdurch seltener notwendig werden.

⁹⁸ Zu ihnen zählen etwa toxische Schwermetalle wie Blei oder Quecksilber, halogenierte Bi- und Terphenyle (PBT, PCB) aufgrund hochgiftiger Verbrennungsprodukte sowie Asbest und andere Mikrofaserbildner aufgrund ihrer krebserregenden Wirkung (Jörissen et al. 2008).

4.1.1.5 Optimierung der Kreislauffähigkeit

Eine Optimierung der Kreislauffähigkeit bedeutet, dass Ressourcen erneut genutzt (wieder- oder weiterverwendet) und so im Kreislauf geführt werden können. Hierfür gibt es eine Reihe von **Strategien**, die sich auf das ganze Produkt (z. B. Modularisierung, Austauschbarkeit von Komponenten), Verbindungen (z. B. leichte Lösbarkeit) oder Materialien (z. B. Kreislauffähigkeit, verminderte Materialvielfalt) beziehen können (vgl. Willmann 2002, Hartel, Spath 1994).

Die Verwendung von **kreislauffähigen Materialien** kann eine Verwertung auf hohem Niveau und damit eine Rückführung in den Kreislauf erlauben. Dies bedeutet, dass die Qualität des Recyclats gegenüber dem Primärwerkstoff nicht bzw. kaum geringer ist und ein „Down-Cycling“ vermieden werden kann. Vorzugsweise sollten etwa Eisen- und Nichteisenmetalle sowie Thermoplaste⁹⁹ zum Einsatz kommen, da sie sich in der Regel sortenrein oder als Gemisch stofflich verwerten lassen.¹⁰⁰

Die **Minderung der Materialvielfalt** kann zu einer geringeren Anzahl von Werkstofffraktionen (höhere Sortenreinheit) und letztendlich zu einem kleineren Aufwand bei der Demontage führen. Bauteil- und Funktionsintegration kann als Optimierungsstrategie dabei unterstützen. Sind in einem Produkt schwer trennbare Verbindungen oder Verbundwerkstoffe enthalten, müssen diese wieder gelöst und damit recyclingfähig gemacht werden, wozu es verschiedene Ansätze gibt (vgl. Kap. 3.3.3.1). Geschieht das Recycling während des Gebrauchs (Aufarbeitung) gilt es, dabei meist die Produktgestalt und Produkteigenschaften zu wahren und fertigungstechnisch Werkstücke rückzugewinnen.¹⁰¹

4.1.2 Beispiele für relevante Potenziale von Technologien zur Steigerung der Ressourceneffizienz in Investitionsgütern

Emergente Technologien beruhen auf unterschiedlichen Wirkphänomenen und weisen dementsprechend variierende Ressourceneffizienzpotenziale auf (vgl. Kap. 3.1.4.2 und 3.2.1.1). *Ein solches wird im Verständnis dieser Arbeit definiert als das Vermögen einer Technologie, eine Senkung des Ressourcenverbrauchs in einem Produkt zu ermöglichen.* Diese können zur Umsetzung von ressourceneffizienzorientierten Optimierungsansätzen dienen, wie sie im Kap. 4.1.1 beschrieben sind.

Auf Basis von Ergebnissen aus diversen Veröffentlichungen¹⁰² zu Technologien (vgl. Tab. 36 im Anhang, Kap. 10.2.1), wurden die für die weitere Betrachtung **relevanten Technologien identifiziert**, um von diesen im Anschluss relevante Ressourceneffizienzpotenziale für Produkte ableiten zu können. Dafür wurden die einzelnen Technologien hinsichtlich der Kriterien

- hohe *Relevanz* für den Einsatz in der Nutzungsphase von Investitionsgütern (vgl. die Ausführungen zur Aufgabenstellung in Kap. 3.1.1) und
- Breite der *Anwendbarkeit*, (etwa in mehreren Produkten unterschiedlicher Branchen) als genereller Indikator für die Attraktivität einer Technologie (vgl. Kap. 3.2.1.2)

⁹⁹ Diese kann man aufschmelzen und je nach Sortenreinheit und Zustand wieder zu einem vergleichbaren Kunststoff aufbereiten.

¹⁰⁰ Auf dem Gebiet der Recyclingfähigkeit neuer Materialien (speziell Multimaterialsysteme) und möglicher verfahrenstechnischer Aufbereitungsprozesse besteht weiterhin großer Forschungsbedarf (Lust 2008).

¹⁰¹ Die Tendenzen zu größerer Werkstoffvielfalt und Verbundwerkstoffen verringern die Potenziale sortenreinen Recyclings.

¹⁰² Dabei handelt es sich im Besonderen um Publikationen aus den Projekten „Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaResS)“ und „Ressourceneffizienzatlas“, „Roadmap Umweltechnologien 2020“ sowie des Foresight-Prozesses des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) (vgl. Rohn et al. 2008, Jörissen et al. 2008, Cuhls et al. 2009).

qualitativ bewertet und ausgewählt. Die Ergebnisse finden sich in Tab. 6.¹⁰³ Die Ressourceneffizienzpotenziale sind dabei möglichst technologieunabhängig und abstrakt formuliert.

Tab. 6: Ermittelte Ressourceneffizienzpotenziale

Ausgewählte Technologien	Begründung für mögliche Ressourceneinsparungen	Ressourceneffizienzpotenziale („RE-Standardlösungen“)
Nachwachsende Rohstoffe und Sekundärmaterialien	Solche Materialien zeichnen sich gegenüber konventionellen Materialien dadurch aus, dass diese häufig geringere ökologische Rucksäcke ¹⁰⁴ aufweisen. Damit gehen Vorteile einher wie größerer Ressourcenreichweite ¹⁰⁵ , keine toxischen / schädlichen Wirkungen, Recyclinggerechtigkeit z. B. aufgrund geringer Werkstoffvielfalt, Kreislauffähigkeit etc. (vgl. Jörissen et al. 2008).	Materialien mit geringem ökologischen Rucksack – <i>Ökomaterialien</i>
Miniaturisierte Elektronikkomponenten	Solche Komponenten, die mit potenziell weniger Materialeinsatz auf immer kleinerem Raum die erforderliche Leistung erbringen. Ein Beispiel ist die Verknüpfung von Technologien zur Mikrostrukturierung mit System- und Integrationstechniken wie beispielsweise in der Aufbau- und Verbindungstechnik (vgl. Pastewski et al. 2009).	Verkleinerte Strukturen unter Beibehaltung der Leistung und Funktion – <i>Miniaturisierung</i>
	Einzelne Komponenten haben mehrere Funktionen und ersetzen damit andere Komponenten, so dass insgesamt weniger Ressourcen benötigt werden. Ein typisches Beispiel aus dem Konsumbereich ist das Mobiltelefon, das zunehmend zusätzliche Funktionen wie Fotografieren enthält (vgl. Jörissen et al. 2008).	Die technische Zusammenführung unterschiedlicher Funktionen in einem Funktionselement oder auch die Integration mehrerer Prozessschritte – <i>Multi-funktionalität</i>
Recycelbare Materialien	Um Materialien recyceln zu können, bedarf es recyclinggerechter Lösungen, die eine weitere recyclingorientierte Behandlung ermöglichen und damit die Stoffe einer erneuten Nutzung zuführen. Maßnahmen sind etwa Modularisierung, trennbare Verbindungen, Verbesserung der Reparaturfreundlichkeit und Vermeidung von Beschichtungen (vgl. VDI 2007).	Frühzeitige Berücksichtigung kreislauf- und entsorgungsgerechter Gestaltungsmaßnahmen – <i>Recyclinggerechte Konstruktion</i>
Energieautarke Sensoren	Energieautarke Sensoren benötigen keine zusätzliche Energie für das Betreiben, da sie diese aus der Umgebung aufnehmen. Beispiele sind Drucksensoren, die die zum Betrieb nötige elektrische Energie aus den Druckluftschwankungen über einen Piezowandler gewinnen oder optische Sensoren, die Energie mittels hocheffizienter Solarzellen erzeugen und zur Werkstoffüberwachung eingesetzt werden können (vgl. Neugebauer et al. 2008).	Die Nutzung von Energie aus der Umgebung zur energetischen Unabhängigkeit – <i>Energieautarkie</i>
Leichte Werkstoffe	Leichte Materialien werden in erster Linie zur Verminderung von benötigter Antriebsleistung und Energie beim Bewegen eingesetzt.	Die Gewichtsreduktion von Komponenten

¹⁰³ Aus einigen der Technologien lassen sich mehrere Ressourceneffizienzsteigerungspotenziale ableiten. So kann etwa die durch die Technologie der „selbstheilenden Materialien“ ermöglichte Ressourceneinsparung sowohl als *Instandhaltung* sowie auch als *Oberflächenfunktionalisierung* interpretiert werden. Auf der anderen Seite lässt sich aus mehreren Technologien auch teilweise dasselbe Ressourceneffizienzsteigerungspotenzial ableiten.

¹⁰⁴ Der ökologische Rucksack ist die sinnbildliche Darstellung der Menge an Ressourcen, die im Lebenszyklus eines Produktes verbraucht werden (Schmidt-Bleek 1997).

¹⁰⁵ Das Verhältnis von Reserven und der jährlichen Fördermenge wird als Reichweite bezeichnet und sehr häufig dazu benutzt, um abzuschätzen, für wie viele Jahre ein bestimmter Rohstoff noch vorhanden sein wird (Endres, Querner 2000).

Ausgewählte Technologien	Begründung für mögliche Ressourceneinsparungen	Ressourceneffizienzpotenziale („RE-Standardlösungen“)
und Materialentwicklungen	Gleichzeitig bietet der Leichtbau neben einer Treibstoffeinsparung auch Optimierungspotenzial hinsichtlich der Materialeffizienz. Dies hat häufig spezielle Anforderungen an Werkstoff und Fertigungstechnik (vgl. Jörissen et al. 2008).	– <i>Leichtbau</i>
Naturnahe Oberflächenstrukturen	Es gibt in der Natur vielfältige Beispiele für einen effizienten Umgang mit Ressourcen. Natürliche biologische Materialien wie Holz oder tierische bzw. pflanzliche Oberflächenstrukturen besitzen häufig eine hohe Funktionalität und Beständigkeit bei gleichzeitig geringem Materialeinsatz. So ist die Lebensdauer dieser Materialien auch meist an ihre Funktion angepasst. Weiterhin sind die Stoffe biologisch abbaubar und werden in einem natürlichen Kreislaufs geführt (vgl. Reuscher et al. 2008).	Nutzung von Konstruktions-, Verfahrens- und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme – <i>Bionik</i>
Condition Monitoring	Während der Nutzungsdauer unterliegen Anlagen einem Prozess der technischen Abnutzung wie Verschleiß, Ermüdung, Alterung, Korrosion etc., der die Beschaffenheit und Leistungsfähigkeit negativ beeinflussen kann (vgl. Alcalde Rasch 2000). Condition Monitoring ermöglicht mit der Überwachung des Maschinenzustands eine Instandhaltung zur Verlängerung der Lebensdauer der Anlage (vgl. Jörissen et al. 2008). Wichtige Aufgaben sind die vorbeugende Wartung die Detektion von Leckagen etwa mittels sogenannter Wireless Diagnose Tools sowie die Entwicklung der Gesamtkonzeption (vgl. Bachmann et al. 2007).	Sicherstellung, dass der funktionsfähige Zustand erhalten bleibt oder bei Ausfall wieder hergestellt wird – <i>Instandhaltung</i>
Selbstheilende Materialien	Selbstheilungseffekte bei Werkstoffen können zur Lebensdauerverlängerung von Oberflächen beitragen. So z. B. im Fall von Korrosionsschutz: In die galvanische Schicht werden flüssigkeitsgefüllte Kügelchen mit eingebracht und verteilt. Wird die Oberfläche beschädigt, tritt die Flüssigkeit aus und „repariert“ die Stelle (vgl. Metzner 2008).	Anpassbarkeit an sich wandelnde Bedingungen oder besondere Einflüsse – <i>Flexibilisierung</i>
Phasenwechselmaterialien	Die bei bestimmten exothermen Prozessen anfallende Abwärme kann durch Phasenwechselmaterialien aufgefangen, gespeichert und entsprechend des Bedarfs genutzt werden. Ein weiteres Beispiel ist die lastgesteuerte Bauteiloptimierung, die eine bedarfsgerechte Anpassung an Erfordernisse (z. B. Lastenverteilung) darstellen (vgl. BMWi 2010).	Bedarfsgerechter Einsatz von Material und Energie- <i>Maßschneiderung</i>
Oberflächentechnologien	Neuartige Oberflächenbeschichtungen können in der Nutzungsphase zu einer höheren Lebensdauer von Produkten führen, Materialien resistenter gegen äußere Einflüsse machen, Einsparungen an Betriebsmitteln mit sich bringen oder auf äußere Einflüsse in einer bestimmten Art und Weise reagieren. Damit können Ressourcen gespart und z. B. die Menge an Abfall, Abwasser und Abluft reduziert werden (vgl. Bachmann et al. 2007).	Die Ausstattung einer Oberfläche mit gewollten Funktionalitäten – <i>Oberflächenfunktionalisierung</i>
Wärmedämmmaterialien	Wärmedämmmaterialien unterstützen die Zielstellung vorhandene Wärme bzw. unvermeidlich entstehende Verlustleistung nicht in die Umgebung entweichen zu lassen, sondern im System zu halten. Damit kann Energie etwa in Heizprozessen effizienter genutzt werden (vgl. Pastewski et al. 2009).	Die Vermeidung eines Durchgangs/Verlustes von wertvollen Stoffen oder Energien aus dem System – <i>Systemabschluss</i>
Sensorik	Durch Modellierung und Simulation können Prozessregelungen und -steuerungen optimiert, Effizienzpotenziale in Anlagen erschlossen und deren Ressourceneinsatz verbessert werden (Behrendt, Erdmann 2010). Themengebiete sind Sensortechnik und Signalauswertung; steuerungintegrierte Möglichkeiten zur Energieeinsparung, Maschinendiagnose und Zustandsüberwachungskonzepte (vgl. Instandhaltung). Darüber hinaus sind auch integrierte Simulati-	Einsatz von intelligenten, energiebedarfs-optimierten Regelungs- und Steuerungsstrategien – <i>Steuerung</i>

Ausgewählte Technologien	Begründung für mögliche Ressourceneinsparungen	Ressourceneffizienzpotenziale („RE-Standardlösungen“)
	onsmodelle und selbstlernende Systeme für die Ferndiagnose – und – wartung relevant.	
Katalyse	Neue Katalyseverfahren unter Einsatz von teilweise maßgeschneiderten Enzymen (z. B. zur Absenkung der Prozesstemperatur oder Erhöhung der Produktausbeute) erlauben z. T. weitreichende Potenziale für Energie- und Materialeinsparung (vgl. Jörisßen et al. 2008).	Neue technologische Effekte bzw. Merkmale, die die gleiche oder eine ähnliche Funktion erfüllen – <i>Alternative Wirkprinzipien</i>

Die dargestellten Ressourceneffizienzpotenziale müssen nicht zwangsläufig in allen Anwendungsfällen zur **Ressourceneinsparung** führen. Häufig erfordern neue Lösungen auch neue Rahmenbedingungen, aus denen zusätzlicher Ressourcenverbrauch entstehen kann. So ist das Ressourceneffizienzpotenzial *Miniaturisierung* zwar auch aus Ressourceneffizienz-Perspektive grundsätzlich zu begrüßen, daraus folgen aber nicht zwangsläufig Einspareffekte etwa aus Materialsicht. So muss hierbei insbesondere auch die Problematik der erschwerten stofflichen Trennung von integrierten Komponenten während des Recyclings berücksichtigt werden. Eine anwendungsbezogene und ganzheitliche Bewertung ist daher grundsätzlich anzuraten (vgl. hierzu Kap. 3.2.2).

4.1.3 Definition der Modellelemente für das Verfahren

In diesem Kap. werden auf Basis der vorherigen Kap. die benötigten Modellelemente RE-Parameter, RE-Grundprinzipien und RE-Standardlösungen definiert. Diese sind in Abb. 12 entsprechend ihrer Aufgaben im Verfahren dargestellt (vgl. Vorgehensweise bei TRIZ in Kap. 3.3.3.2).

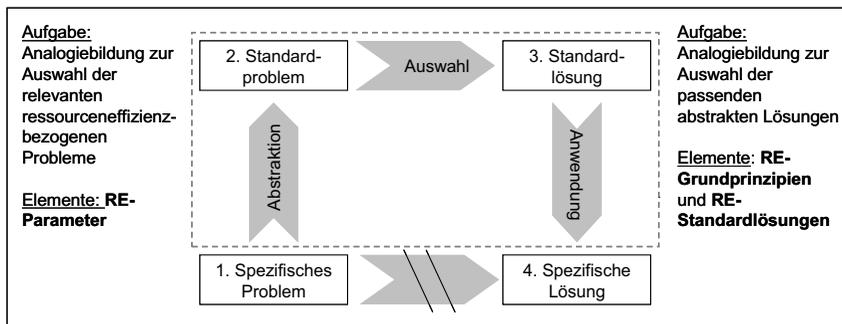


Abb. 12: Anwendung der Modellelemente RE-Parameter, RE-Grundprinzipien und RE-Standardlösungen des Verfahrens (vgl. Bannert 2008)

Als wesentlicher Unterschied zu der klassischen TRIZ-Methodik erfolgt im Verfahren bei der Auswahl von Standardlösungen keine Zuordnung der Grundprinzipien zu bestimmten Widersprüchen aus zu verbessernden und zu verschlechternden Parametern.¹⁰⁶ Stattdessen werden RE-Standardlösungen per Analogiebildung aus RE-Grundprinzipien entwickelt, die sich

¹⁰⁶ Für die Abstraktion auf ressourceneffizienzbezogene Standardprobleme sind diese Parameter allerdings nicht praktikabel, da bei den zu betrachtenden ressourceneffizienzbasierten Problemstellungen keine binäre Konstellationen zu finden sind (vgl. Kap. 3.3.3.2).

wiederum aus definierten RE-Parametern ableiten lassen. Die RE-Parameter dienen in diesem Verfahren der abstrakten Schwachstellenbeschreibung, die RE-Grundprinzipien und RE-Standardlösungen der effektiven Lösungsfindung. Im Folgenden werden diese Modellelemente näher beschrieben.

4.1.3.1 RE-Parameter

Im Verfahren folgt im Anschluss an die Definition der konkreten ressourcenverbrauchsbezogenen Schwachstelle die **Übersetzung in ein passendes Standardproblem**. Hierfür ist es notwendig, dass die einzelnen RE-Parameter eine möglichst allgemeine, aber dennoch trennscharfe Kategorisierung darstellen. Zentrale Aspekte eines RE-Parameters sind daher:

- der *prinzipielle Ansatz*: Mit dem prinzipiellen Ansatz wird die grundlegende Unterscheidung getroffen, ob es sich bei dem zu beschreibenden Problem um eine prozess- oder materialbezogene Fragestellung¹⁰⁷ handelt (vgl. Kap. 3.1.4.2).
- der zu senkende *Ressourcenverbrauch*: Hierbei wird das Problem hinsichtlich des zu adressierenden Ressourcenverbrauchs (Energie und Material bzw. Wasser)¹⁰⁸ beschrieben.
- die zu adressierende *Wirkdimension*: Mit der Auswahl des zu verbessernden Systems werden die durch das Problem primär betroffenen Wirkdimensionen, Funktionselement, Produkt oder Produktsystem (vgl. Kap. 3.1.4.2) definiert.¹⁰⁹ Das Funktionselement kann dabei entweder ein Material / Stoff (z. B. Stahl) oder eine Komponente (z. B. Heizelement) darstellen. Die Dimension Produkt betrifft das Produkt im engeren Sinne. Das Produktsystem bezieht sich auf das gesamte erweiterte System im Umfeld des Produktes während dessen Nutzung und kann mehrere Produkte einbeziehen.

Die mittels dieser drei Aspekte zu wählenden RE-Parameter (vgl. Tab. 7) erlauben im Verfahren letztendlich als Element der zentralen produktbezogenen Ressourceneffizienzfunktion (PReF) (vgl. Kap. 5.2.2.2) die Zuordnung zu den im folgenden Kap. entwickelten Optionen zur Ressourceneffizienzsteigerung (RE-Grundprinzipien).

¹⁰⁷ Ein prozessbezogener Ansatz liegt vor, wenn die Problemstellung mit dem Ablauf eines Prozesses verbunden ist, z. B. der Aufheizvorgang eines Heizelements. Ein materialbezogener Ansatz liegt vor, wenn die Problemstellung mit dem Einsatz eines Materials verbunden ist, z. B. mit der Beschichtung einer Oberfläche.

¹⁰⁸ Material und Wasser werden hier der Einfachheit halber zusammen betrachtet, da es sich bei beiden Ressourcenkategorien um einen stofflichen Verbrauch handelt (vgl. Kap. 3.1.1).

¹⁰⁹ Ist die Problemstellung auf eine Komponente wie z. B. ein Heizelement oder ein Material begrenzt, so ist das System des Funktionselements betroffen. Ist die Problemstellung auf das Produkt begrenzt, z. B. auf eine Reinigungsanlage, so ist die Wirkdimension des Produktes relevant. Ist in der Problemstellung ein ganzer Produktionsschritt betroffen, der mehrere Produkte umfassen kann, so ist die Wirkdimension des Produktsystems betroffen. Die weitere Dimension beinhaltet die jeweils kleinere.

Tab. 7: Mögliche Varianten an RE-Parametern

Prinzipieller Ansatz	Zu senkender Ressourcenverbrauch	Wirkdimension	Benennung	Beispiele
Prozessbezogener	Energieverbrauch	im Funktionselement	PEF	Energieverbrauch des Heizelements im Aufheizprozess
Prozessbezogener	Energieverbrauch	im Produkt	PEP	Energieverbrauch beim Einschalten des Produktes
Prozessbezogener	Material- bzw. Wasserverbrauch	im Produkt	PMP	Reinigungsmittelverbrauch im Betrieb des Produktes
Prozessbezogener	Energieverbrauch	im Produktsystem	PEPS	Heizenergieverbrauch beim Aufheizen und Abkühlen (mehrere Produkte)
Prozessbezogener	Material- bzw. Wasserverbrauch	im Produktsystem	PMPS	Wasserverbrauch im gesamten Waschvorgang (mehrere Produkte)
Materialbezogener	Energieverbrauch	im Funktionselement	MEF	Wärmeverlust an Außenwand des Heizelements
Materialbezogener	Material- bzw. Wasserverbrauch	im Funktionselement	MMF	Reinigungsmittelverbrauch an der Rohrrinnenwand
Materialbezogener	Energieverbrauch	im Produkt	MEP	Wärmeverlust an Außenwand des Produktes
Materialbezogener	Material- bzw. Wasserverbrauch	im Produkt	MMP	Reinigungsmittelverbrauch im Produkt
Materialbezogener	Energieverbrauch	im Produktsystem	MEPS	Konstruktionsbedingte Wärmeverluste im gesamten Produktionsschritt (mehrere Produkte)
Materialbezogener	Material- bzw. Wasserverbrauch	im Produktsystem	MMPS	Reinigungsmittelverbrauch im gesamten Produktionsschritt (mehrere Produkte)

4.1.3.2 RE-Grundprinzipien

Als RE-Grundprinzipien dienen die in Kap. 4.1.1 definierten Optimierungsansätze. Diese zeichnen sich u. a. auch durch eine primäre Wirkdimension (vgl. Kap. 4.1.3.1) aus, womit eine entsprechende Zuordnung möglich ist (vgl. Tab. 8). So erlaubt die *Substitution von Ressourcen (GP1)* eher räumlich begrenzte Lösungen, wohingegen die *Optimierung der Kreislauffähigkeit (GP5)* meist räumlich weitreichende Lösungen hervorbringt.

Tab. 8: Ermittelte RE-Grundprinzipien

RE-Grundprinzipien	Eignung	Primäre Wirkdimension
Substitution von Ressourcen (GP1)	Mit diesem Prinzip können Lösungsprinzipien zur Substitution ungünstiger Ressourcen im Funktionselement ermittelt werden.	Funktionselement
Steigerung der Effizienz (GP2)	Mit diesem Prinzip können Lösungsprinzipien zur Steigerung der Effizienz im übergreifenden Produktsystem ermittelt werden.	Produktsystem
Minderung von Abfall / Ausschuss (GP3)	Mit diesem Prinzip können Lösungsprinzipien zur Minderung von Abfall bzw. Ausschuss im Produkt ermittelt werden.	Produkt
Verlängerung der Lebensdauer (GP4)	Mit diesem Prinzip können Lösungsprinzipien zur Verlängerung der Lebensdauer des Produktes ermittelt werden.	Produkt
Optimierung der Kreislauffähigkeit (GP5)	Mit diesem Prinzip können Lösungsprinzipien zur Optimierung der prozessinternen Kreislauffähigkeit von Ressourcen im Produktsystem ermittelt werden.	Produktsystem

Die ermittelten RE-Grundprinzipien stellen **Optionen zur Ressourceneffizienzsteigerung** dar und fungieren in dem zu entwickelnden Verfahren mit ihrem Zuschnitt auf Investitionsgüter des Maschinen- und Anlagenbaus und der disziplinübergreifende Gültigkeit¹¹⁰ als Wegbereiter zu neuen Lösungen.

4.1.3.3 RE-Standardlösungen

Für die Bestimmung konkreter neuer Lösungsprinzipien für Produkte ist zunächst die Bestimmung **standardisierter technologischer Lösungen** geboten, um den relevanten Lösungsraum festzulegen und überschaubar zu machen. In diesem Modell werden diese als RE-Standardlösungen bezeichnet. Sie entsprechen den in Kap. 4.1.2 hergeleiteten Ressourceneffizienzpotenzialen (Tab. 6) und sind in Tab. 9 des Kap. 4.1.4 aufgeführt. **Beispielsweise** bietet die RE-Standardlösung *Leichtbau* die Lösungsoption, neue Materialien wie *Aluminiumschaum* oder spezielle Materialkombinationen zur Einsparung von den Ressourcen Material und Energie (z. B. Gewicht und Bewegungsenergie) einzusetzen. Die RE-Standardlösung *Energieautarkie* umfasst hier technologische Lösungsprinzipien, die ohne externe Energieversorgung (z. B. energieautarke Sensoren) auskommen.

4.1.4 Verknüpfung der Modellelemente des Verfahrens

In dem Verfahren **dienen** die beschriebenen Modellelemente der schrittweisen Abstraktion einer identifizierten Schwachstelle bis zur Definition erster abstrakter Lösungen. Dafür ist eine Verknüpfung der Elemente untereinander notwendig.

Basierend auf der **Zuordnung** nach Eignung und Wirkdimension in Tab. 8 des letzten Kap. und einer Betrachtung hinsichtlich der prinzipiellen Erfüllbarkeit eines RE-Grundprinzips durch einen RE-Parameter wurde deren Korrelation ermittelt (vgl. Tab. 37 des Kap. 10.2.1 im Anhang). So kann für die Schwachstelle eines Produktes, die mit dem RE-Parameter *Prozessbezogener Energieverbrauch im Produktsystem* (PEPS) zu beschreiben ist, das RE-Grundprinzip *Optimierung der Kreislauffähigkeit* eine denkbare ressourceneffizienzsteigernde Option darstellen. Dieses könnte im nächsten Schritt in der Wirkdimension des Produkt-

¹¹⁰ Dies ist für das Verfahren notwendig, da Lösungsprinzipien mit Ressourceneffizienzsteigerungspotenzial in vielen unterschiedlichen Disziplinen und Branchen zu finden sind.

systems mittels einer passenden RE-Standardlösung ein technologisches Lösungsprinzip zur internen Kreislaufführung der Ressource *Energie* etwa mittels innovativer Steuerung unterstützen.

Die RE-Grundprinzipien **unterscheiden** sich z. T. stark in der Anzahl an RE-Parametern, mit denen eine Korrelation denkbar ist. Insbesondere das RE-Grundprinzip *Steigerung der Effizienz* ist universell, stellt also eine denkbare Option für alle RE-Parameter dar. *Minderung von Abfall / Ausschuss* ist hingegen nur für wenige RE-Parameter eine naheliegende Option.

Bei der Gegenüberstellung der RE-Grundprinzipien mit den möglichen RE-Standardlösungen kann ebenfalls von einer mehr oder weniger ausgeprägten Korrelation ausgegangen werden (Tab. 9). So kann das RE-Grundprinzip der *Substitution von Ressourcen* unmittelbar mit der RE-Standardlösung Ökomaterialien als denkbare technologische Lösung adressiert werden. Auch bei dem Anspruch der Realisierung von Leichtbau kann die *Substitution von Ressourcen* ein erfolgversprechender Lösungsansatz sein. In beiden Fällen kann daher eine große Korrelation (Einflussmöglichkeit) angenommen werden.

Tab. 9: Korrelation der RE-Grundprinzipien zu RE-Standardlösungen mit beispielhaften Ansätzen

RE-Standardlösungen	Substitution von Ressourcen (GP1)	Steigerung der Effizienz (GP2)	Minderung von Abfall / Ausschuss (GP3)	Verlängerung der Lebensdauer (GP4)	Optimierung der Kreislauffähigkeit (GP5)
Ökomaterialien	● (Dämmmaterial aus nachwachsenden Rohstoffe)	○	○	○	○
Miniaturisierung	○	● (Elektronikkomponenten)	● (kleinere Bauteile)	○	○
Multifunktionalität	○	● (Elektronikkomponenten)	● (kleinere Bauteile)	○	○
Recyclinggerechte Konstruktion	○	○	● (leicht trennbare Verbundmaterialien)	○	○
Energieautarkie	○	● (Sensorik)	○	○	○
Leichtbau	○	● (Aluminium-Leichtbauweise)	○	○	○
Bionik	○	● (Strömungswiderstand-reduzierende Oberflächenstrukturen)	○	○	○
Instandsetzung und Instandhaltung	○	○	● (Optimierung der Materialbeständigkeit)	● (Optimierung der Materialbeständigkeit)	○
Flexibilisierung	○	● (selbstheilende Materialien)	○	○	○
Maßschneidung	● (lastgesteuerte Bauteile)	○	○	○	○
Oberflächenfunktionalisierung	● (multifunktionale Oberflächenbeschichtung)	● (Optimierung der Kratzfestigkeit)	● (Optimierung der Kratzfestigkeit)	● (Optimierung der Kratzfestigkeit)	○
Systemabschluss	○	● (Wärmedämmung)	○	○	● (Schließung von Kreisläufen)
Steuerung	○	● (abgestimmte Steuerung)	○	● (verschleiß-reduzierende Steuerung)	○
Alternative Wirkprinzipien	● (funktionale Materialien)	● (funktionale Prozesse)	● (funktionale Prozesse)	● (funktionale Prozesse)	● (funktionale Prozesse)

Legende: hohe Einflussmöglichkeit ● Einflussmöglichkeit gegeben ○ keine Einflussmöglichkeit ○

Die RE-Standardlösung *Alternative Wirkprinzipien* zeichnet sich dadurch aus, dass diese für alle ressourceneffizienzsteigernden Optionen angewendet werden und somit eine Lösung

bieten kann. Aus diesem Grund kann diese an entsprechender Stelle im Verfahren (vgl. Kap. 5.3.2.1) etwa immer dann zusätzlich verwendet werden, wenn mittels der anderen RE-Standardlösung keine brauchbaren Lösungsprinzipien ermittelbar sind.

Die dargestellten Modellelemente stellen die **zentralen Bewertungsparameter** im Verfahren dar und sind zur Lösungsentwicklung von essentieller Bedeutung.

4.2 Grundlagen des Verfahrens

Grundlage für das Verfahren sind die im Folgenden beschriebenen Bestandteile (Kap. 4.2.1) sowie die benötigte Struktur (Kap. 4.2.2) und Charakterisierung (Kap. 4.2.3). Dies wurde entsprechend der in den Kap. 3.2.5 und 3.3.4 formulierten Anforderungen erarbeitet.

4.2.1 Bestandteile des Verfahrens

Zunächst werden die vorhandenen ressourceneffizienzbezogenen Problemstellungen des Produktes mit einer Schwachstellenanalyse aufgenommen und beschrieben. Auf Basis der identifizierten Schwachstellen erlaubt die anschließende als Problemlösungsprozess verstandene Lösungssuche die systematische Entwicklung von technologischen Lösungsprinzipien. Angestrebt wird dabei die konzeptionelle Änderung in der Funktionsrealisierung des Produktes. Die identifizierten alternativen technologischen Lösungsprinzipien sollen sich dabei komplementär, substituierend oder neuartig zu den bisher angewendeten Lösungsprinzipien stellen und dabei sowohl funktionalen, ressourceneffizienzbezogenen als auch ökonomischen Anforderungen genügen (vgl. Kap. 3.2.1.4 und 3.2.2).

Das Verfahren beruht auf einer **funktionsbasierten Beschreibung**, die in dem Verfahren eine Übersetzungsaufgabe zwischen Produkt und Technologie erfüllt (vgl. Kap. 3.3.1). Dabei erfolgt die Formalisierung der Produktdomäne auf der Grundlage von technologieneutralen produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF) und die der Technologiedomäne aus emergenten Technologien mit Ressourceneffizienzpotenzial mit produktneutralen Technologiebezogenen Ressourceneffizienz-Funktionen (TReF) (vgl. hierzu DIN 1996). Der dazu erforderliche technologieorientierte Zugang zum Konzept der Ressourceneffizienz wird mittels des ressourceneffizienzbezogenen Technologiepotenzialmodells erschlossen (vgl. Kap. 4.1).

4.2.2 Struktur des Verfahrens

Die grundlegende Struktur des Verfahrens soll eine organisatorische und methodische **Verankerung** in der unternehmerischen Führungs- und Planungsfunktion gewährleisten. Vor diesem Hintergrund wird das Verfahren in fünf einzelne Phasen gegliedert, welche einem allgemeinen Problemlösungsprozess im Kontext der Produktentwicklung ähneln (vgl. Abb.13).¹¹¹ Die Suche nach Lösungsprinzipien erfolgt dabei unter Zugrundelegung einer systematisch-diskursiven Vorgehensweise. Folgende Phasen werden durchlaufen:

- Phase I: *Definition der Zielstellungen*
- Phase II: *Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme*
- Phase III: *Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen*
- Phase IV: *Ganzheitliche Bewertung der Lösungen*
- Phase V: *Planung der Maßnahmen*

¹¹¹ Die Phasen wurden in Anlehnung an das Vorgehen für beliebige Hauptanforderungen Design to X (Kap. 3.3.3.1), der VDI 2221 (vgl. Tab. 34 im Anhang, Kap. 10.1.3), den TRIZ-Phasen (Kap. 3.3.3.2) und einen Problemlösungsprozess mit den vier Hauptphasen Problemidentifikation, Problemdiagnose, konzeptionelle Problemlösung und Implementierung (vgl. Krüger 1992) definiert.

In der **Phase I** werden die Zielstellungen des Verfahrens definiert. Hierzu gehört die Erfassung des zu betrachtende Analysegegenstandes (Produkt) (Schritt I.a). Zudem werden technisch-funktionale, ressourceneffizienzbezogene und ökonomische Zielstellungen festgelegt (Schritt I.b).

In der **Phase II** erfolgt zuerst die Schwachstellenanalyse des Produktes (Schritt II.a). Dafür müssen nach der Dekomposition vorhandene Informationen zu ressourceneffizienzbezogenen Schwachstellen zusammengetragen und beschrieben werden. Mittels der Modellelemente aus Kap. 4.1.3 liefert Schritt II.b anschließend die Problembeschreibung.

In der **Phase III** werden zunächst für die identifizierten Problemstellungen des Produktes mögliche abstrakte ressourceneffizienzsteigernde Lösungen ermittelt (Schritt III.a) und beschrieben (Schritt III.b). Im Anschluss findet die Identifikation relevanter Experten sowie die Recherche passender Lösungsprinzipien statt (Schritt III.c).

In der **Phase IV** erfolgt die detaillierte ganzheitliche Begutachtung der Lösungsprinzipien in der Funktionalitätsbewertung (Schritt IV.a), Ressourceneffizienzbewertung (Schritt IV.b) und Kostenbewertung (Schritt IV.c).

In der **Phase V** werden zur Planung von Maßnahmen schließlich eine Nutzenbetrachtung der bewerteten Lösungsprinzipien (Schritt V.a) durchgeführt und Entscheidungen vorbereitet (Schritt V.b).

Phasen des Verfahrens	Entsprechende Phasen nach VDI 2221
Phase I: Definition der Zielstellungen Schritt (I.a): Auswahl Analysegegenstand Schritt (I.b): Definition Zielsetzungen	Klären und präzisieren der Aufgabenstellung
Phase II: Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme Schritt (II.a): Schwachstellenanalyse: Dekomposition des Produktes, Ermittlung von Schwachstellen in der Nutzungsphase, Schwachstellenbeschreibung Schritt (II.b): Definition Produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktion (PREF)	Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen
Phase III: Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen Schritt (III.a): Ermittlung abstrakter Lösungen: Definition der RE-Grundprinzipien, Definition der RE-Standardlösungen, Bewertung prinzipielle Eignung Schritt (III.b): Definition Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktion (TRFE) Schritt (III.c): Recherche Lösungsprinzipien: Identifikation von Experten, Identifikation von Lösungsprinzipien	Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen
Phase IV: Ganzheitliche Bewertung der Lösungen Schritt (III.a): Funktionalitätsbewertung: Berechnung der Funktionalitätsgrade der Lösungsprinzipien, Berechnung der Korrelation der Lösungsprinzipien, Berechnung der Priorität eines Lösungsprinzips, Bestimmung der Leistung eines Lösungsprinzips Schritt (III.b): Ressourceneffizienzbewertung: Bewertung des Ressourcenverbrauchs der Lösungsprinzipien, Abschätzung des künftigen Ressourcenbedarfs der Lösungsprinzipien Schritt (III.c): Kostenbewertung: Berechnung der Lebenszykluskosten der Lösungsprinzipien	
Phase V: Planung der Maßnahmen Schritt (IV.a): Nutzenbetrachtung: Entwicklung der Nutzenfaktoren, Vergleichende Darstellung des Nutzens der Lösungsprinzipien Schritt (IV.b): Entscheidung vorbereiten: Portfoliobewertung, Maßnahmen	Entwerfen und Ausarbeiten

Abb. 13: Phasen des Verfahrens im Vergleich zu dem Vorgehen in der Produktentwicklung nach VDI 2221 (VDI 1993)

4.2.3 Charakterisierung des Verfahrens

Das vorgestellte Verfahren stellt einen neuartigen Ansatz zur ressourceneffizienzorientierten Weiterentwicklung von Produkten dar. Es unterscheidet sich von bestehenden Verfahren durch folgende Merkmale:

- Das Verfahren zielt mit der Induzierung einer Ressourceneffizienzsteigerung auf die Optimierung des ganzheitlichen Nutzens eines Produktes in der Nutzungsphase ab.

- Die ermöglichte Identifizierung der zentralen Schwachstellen als Ressourcenverbrauchspotenziale bietet die Basis zur Entwicklung neuer Lösungen im Verfahren.
- Geboten wird eine methodische, problemlösungsorientierte Unterstützung im Hinblick auf die Lösungsentwicklung und Auswahl der technologischen Lösungsprinzipien aus dem Bereich der emergenten Technologien.
- Die Lösungsentwicklung wird im Verfahren methodisch durch den Einsatz eines Technologiepotenzialmodells vereinfacht und effizienter gestaltet.
- Vorhandenes internes und externes Wissen wird explizit aufgenommen und systematisch zur Suche und Bewertung neuer Lösungsprinzipien genutzt.
- Die Vorgehensweise bei der Bewertung der Lösungsprinzipien erlaubt eine umfassende Berücksichtigung des ganzheitlichen Nutzens.
- Das Verfahren kombiniert die Stärken vorhandener Ansätze aus Technologiebewertung und Produktweiterentwicklung.
- Das Verfahren ordnet sich in den Produktentwicklungsprozess ein und soll dort die ressourceneffizienzorientierte Weiterentwicklung unterstützen.

4.3 Anforderungen an das Verfahren

Aufbauend auf die bisherigen Erläuterungen können nun Aussagen darüber getroffen werden, welche **Anforderungen** das zu entwickelnde Verfahren im Hinblick auf eine regelmäßige Anwendung in der betrieblichen Praxis erfüllen soll. Diese lassen sich in übergreifende Anforderungen zur Gewährleistung der praxismgerechten Anwendung und problemstellungsbezogene Anforderungen zur Sicherung des zielstellungskonformen Vorgehens unterscheiden. Den übergreifenden Anforderungen kann eine gewisse Allgemeingültigkeit zugeschrieben werden. Die problemstellungsbezogenen Anforderungen leiten sich aus den Zielsetzungen der Arbeit (vgl. Kap. 2.1) und den Defiziten existierender Verfahren (vgl. Kap. 3.4) ab.

4.3.1 Übergreifende Anforderungen

Diese übergreifenden Anforderungen werden an das Verfahren gestellt:

- Für die Akzeptanz des Verfahrens ist es notwendig, dass das Verfahren einen hohen Praxisbezug sowie eine überschaubare Komplexität aufweist. Die **Anwendbarkeit** des Verfahrens bedingt einen transparenten und übersichtlichen Aufbau. Praktikabilität wird durch ein der Problemstellung angemessenes Aufwand-Nutzen-Verhältnis charakterisiert. Im konkreten Anwendungsfall ist daher auf einen der Zielstellung entsprechenden Zeit- und Personalaufwand zu achten. Weiterhin soll jeder Verfahrensschritt einen Erkenntnisgewinn bewirken. Insgesamt muss der Nutzen der Durchführung des Verfahrens den Aufwand rechtfertigen.
- Die benötigte **Benutzerfreundlichkeit** des Verfahrens und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse erfordern eine überschaubare und transparente Abfolge klar strukturierter Schritte. Anspruchsvolle Zusammenhänge sind anschaulich darzustellen und Ergebnisse zu visualisieren. Hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit ist darüber hinaus sicherzustellen, dass die eingesetzten Verfahrenselemente relativ einfach zu erlernen und verständlich sind. Weiterhin gilt es, die methodische Anlehnung und ggf. Anschlussfähigkeit sowie Integration der in der Praxis anerkannten Ansätze zu gewährleisten.
- Die Notwendigkeit der **Flexibilität** des Verfahrens leitet sich aus der Vielfalt der möglichen Anwendungsfälle in der Produktweiterentwicklung sowie den jeweiligen Randbedingungen im Unternehmen ab. Bei Bedarf müssen einzelne Verfahrensschritte angepasst oder übersprungen werden können. Aufgrund der hohen Dynamik im Umfeld der Produktentwicklung muss das Verfahren gewährleisten, dass die vorhande-

nen Verfahrenselemente erweiterbar und ausbaufähig sind.

4.3.2 Problemstellungsbezogene Anforderungen

Folgende problemstellungsbezogene Anforderungen werden an das Verfahren formuliert:

- Das Verfahren soll Unternehmen befähigen, **ressourcenverbrauchsbezogene Schwachstellen** eines bestehenden Produktes in der Nutzungsphase systematisch zu identifizieren und zu analysieren. Die Identifikation der Schwachstellen muss effektiv sein, indem solche Themen identifiziert werden, für die emergente Technologien mit Ressourceneffizienzpotenzial prinzipielle Lösungen bieten können.
- Auf Grundlage der ermittelten Schwachstellen gilt es anschließend, problemlösungsorientiert und in einer kreativen Weise neue **alternative Lösungsprinzipien** vor dem Hintergrund der gestellten Zielstellungen und Anforderungen zu ermitteln. Ressourceneffizienzsteigernde Technologien haben ein breites Anwendungsspektrum, entsprechend soll im Verfahren die Identifikation von neuen Lösungsprinzipien umfassend und branchenunabhängig erfolgen.
- Das Verfahren soll auf formalisierten technologischen ressourceneffizienzbezogenen Prinzipien als systematischer **Zugang zur Ressourceneffizienz** aufbauen. Die Beschreibungen und Strukturierungen eines hierfür benötigten Modells sollen zielführend sein, indem sie alle relevanten Elemente definieren, die für die Verfahrensschritte notwendig sind. Diese sollen als Grundlage des Verfahrens unabhängig von technologischen Entwicklungen und anwendungsunabhängig Gültigkeit besitzen.
- Im Rahmen des Verfahrens müssen relevante Informationen zusammengeführt werden, um letztendlich die marktkonforme Weiterentwicklung eines Produktes zu unterstützen, die sowohl **funktionale als auch ressourceneffizienzbezogene und ökonomische Ansprüche** im Sinne des ganzheitlichen Nutzens stellt. Diese sollten grundsätzlich unternehmensinternem und unternehmensexternem Wissen entstammen. Hierbei soll auch implizites, außerhalb des bisherigen Wissensbereichs liegendes Wissen eingebunden werden.
- Das Verfahren soll **anschlussfähig** sein, indem vorhandene Methoden integrierbar sind, möglichst Informationen in bestehenden Formaten verwendet werden und erzielte Ergebnisse auch anderweitig nutzbar sind. Dafür gilt es, geeignete praxistaugliche Methoden einschlägiger Disziplinen anzupassen und zu kombinieren. Das Verfahren soll in die Produktentwicklung integriert werden, um so eine organisatorische und methodische Verankerung zu gewährleisten.

5 Entwicklung des Verfahrens zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung unter Einsatz emergenter Technologien

Auf Grundlage der in Kap. 4 erläuterten Konzeption und unter Beachtung der Anforderungen wird im Folgenden das Verfahren zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung unter Einsatz emergenter Technologien in der Nutzungsphase entwickelt.

Das schrittweise **Vorgehen** nach den fünf Phasen (vgl. Kap. 4.2.2) wird nicht als streng einzuhaltende lineare Abfolge verstanden. Vielmehr können Schleifen zwischen den Schritten notwendig sein.

5.1 Phase I: Definition der Zielstellungen

5.1.1 Ziel der Phase I

In dieser Verfahrensphase werden die grundlegenden Rahmenbedingungen für die anvisierte Weiterentwicklung eines Produktes bestimmt. Hierzu gehören die Wahl des zu betrachtenden Analysegegenstands und die Erfassung der relevanten Zielstellungen des Unternehmens.

5.1.2 Methodisches Vorgehen

Phase I ist in die Schritte I.a *Auswahl Analysegegenstand* und I.b *Definition Zielstellungen* geteilt, die im Folgenden beschrieben werden. Abb. 14 zeigt diese Abfolge mit den zu tätigen Festlegungen.

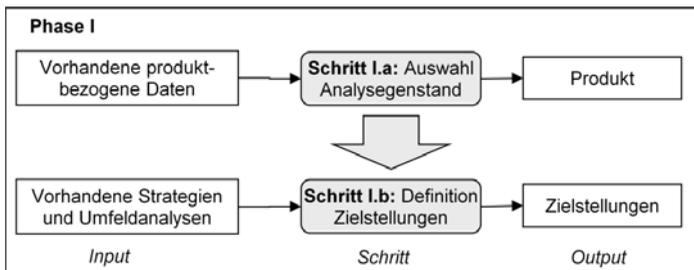


Abb. 14: Schritte von Phase I (Definition der Zielstellungen)

5.1.2.1 Schritt I.a: Auswahl Analysegegenstand

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass in dem gesamten **Produktspektrum** eines herstellenden Unternehmens Potenziale vorhanden sind, Ressourcen einzusparen. In der Regel ist es allerdings sinnvoll, mit der Betrachtung bei jenen Produkten zu beginnen, bei denen das vermutete Einsparpotenzial an Ressourcen und Kosten während deren Nutzung vergleichsweise groß ist.

Daher muss an dieser Stelle zuerst der Analysegegenstand gewählt werden. Wie in Kap. 3.3.1 aufgeführt, machen die komplexen industriellen Investitionsgüter des Maschinen- und Anlagenbaus den Fokus dieser Arbeit aus. Dabei kann es sich bei dem **Analysegegenstand** je nach Ausgangsbedingung um eine Produktkomponente bzw. ein Bauteil, ein komplettes Produkt oder eine Kombination von mehreren Produkten handeln, die in einem eingrenzbaaren Zusammenhang während der Nutzungsphase (Produktsystem) stehen. Im Folgenden wird der Analysegegenstand vereinfacht als Produkt bezeichnet.

Für die **Wahl** eines geeigneten Produkts aus dem Produktportfolio des Unternehmens können Checklisten¹¹² eingesetzt werden, da diese eine erste Bestandsaufnahme relevanter Daten ermöglichen. Die in Tab. 38 im Anhang dargestellte Version zur Auswahl des Produkts stellt eine für dieses Verfahren adaptierte Form mit typischen Bewertungsaspekten im Kontext der Umweltwirkungsbewertung dar. Diese lassen sich in allgemeine Produktdaten, Faktoren des wirtschaftlichen Erfolges und ressourceneffizienzbezogene Faktoren einteilen. Meist werden solche Produkte gewählt, die ein vergleichsweise großes und mit wenig Aufwand möglichst unternehmensintern zu realisierendes Verbesserungspotenzial aufweisen. Die Berücksichtigung von Komponenten, die nicht in Eigenproduktion hergestellt, sondern von Zulieferern zugekauft werden, erhöht den Aufwand des Verfahrens. Wesentliche Schritte müssen dann in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Lieferanten durchgeführt werden.

5.1.2.2 Schritt I.b: Definition Zielstellungen

Die ressourceneffizienzorientierte Weiterentwicklung von Produkten muss mit den **einschlägigen Zielstellungen des Unternehmens übereinstimmen**. Daher sind nun zwecks einer ganzheitlichen Kompatibilität sowohl technisch-funktionale, ressourcennutzungsbezogene als auch ökonomische Zielstellungen (vgl. Kap. 3.2.5) zu definieren. Bezug ist dabei das Unternehmen und der gewählte Analysegegenstand (Produkt) selbst.¹¹³ In Tab. 10 sind die relevanten Zielkategorien beschrieben.

Unternehmensbezogene Anforderungen (Unternehmens-Zielstellungen) werden als Formalziele aus vorhandenen Unternehmens-, Produkt- und Marktstrategien abgeleitet, die sich aus internen oder externen Anforderungen, etwa als Antwort auf Trends ergeben. Externe Anspruchsgruppen können beispielsweise Kunden und Lieferanten sein. Bezüglich Ressourceneffizienz können insbesondere auch von öffentlichen Akteuren wie Stakeholdern, Gesetzgeber, Nichtregierungsorganisationen (NGO) wichtige Impulse und Anforderungen ausgehen (vgl. Ausführungen zur ITA in Kap. 3.2.1.3).

Weiterhin werden Sachziele als Anforderungen an das **Produkt** selbst definiert (Produkt-Zielstellungen). Diese werden beispielsweise aus Erfahrungen der Vorserie seitens Mitarbeitern oder Kunden sowie den Anforderungen aus einschlägigen Vorschriften (z. B. Arbeitsschutzgesetz) mittels Anforderungsliste abgeleitet. Hier ist zudem eine Differenzierung zwischen Muss- und Kann-Zielen vorzunehmen. Muss-Ziele ergeben sich aus festen Forderungen, die von dem weiterentwickelten Produkt eingehalten werden müssen. Beispiele sind hier die Forderung nach Alleinstellungsmerkmalen, die Forderung nach Emissionsminderung (CO₂-Footprint¹¹⁴), umweltschutzbezogene Rechtskonformität mit bestimmten Normen und Standards, Sicherheitsvorschriften oder spezielle Kundenwünsche.

Die Ziele werden deduktiv aus den erwähnten Quellen entwickelt und anschließend inhaltlich gruppiert und hierarchisch geordnet. Bei der **Zielformulierung** sind geltende Grundsätze zu berücksichtigen wie die Verwendung klarer und präziser Formulierungen (vgl. z. B. Bullinger et al. 2000). Es kann im Laufe des Verfahrens sinnvoll sein, die Zielstellungen zu überprüfen und ggf. neu zu priorisieren und zu ergänzen.

¹¹² Checklisten werden als eine sehr simple und schnell anzuwendende Methode beschrieben, die primär der Ermittlung entscheidender Faktoren und deren erster Vorbewertung dient (Specht, Möhrle 2002). Somit ist die Checkliste geeignet, eine Basis für die Bewertung der Themen oder Bewertungsgegenstände mit relativ wenig Aufwand zu leisten, die einer genaueren Analyse bedürfen. Im Rahmen der Umweltwirkungsbewertung werden Checklisten zur orientierenden Bewertung über den gesamten Prozess der Produkt- bzw. Technologiebewertung häufig eingesetzt, so dass diese für eine Vielzahl unterschiedlicher Fragestellungen vorhanden sind (Schimpf et al. 2000, Schaltegger 2004).

¹¹³ Zielstellungen an potenzielle technologische Lösungsprinzipien werden in der Schwachstellenbeschreibung (Schritt II.a) bestimmt.

¹¹⁴ Der CO₂-Footprint soll als Ergebnis einer Bilanz ein Maß für die ökologisch-langfristige Betrachtung der Menge des Treibhausgases Kohlendioxid bieten (BMU 2009b).

Tab. 10: Unternehmens- und Produkt-Zielstellungen

Zielkategorien	Bedeutungen	Verwendungen im Verfahren	Beispiele
Technische Unternehmens-Zielstellungen (Z _{T1})	Diese Ziele sichern die grundsätzliche Übereinstimmung der Lösungen mit technischen Unternehmenszielstellungen	<ul style="list-style-type: none"> • Bewertung prinzipielle Eignung (Schritt III.b) • Entscheidung vorbereiten (Schritt V.b) 	<ul style="list-style-type: none"> • Positionierung als Technologieführer • technische Diversifizierung
Technische Produkt-Zielstellungen (Z _{T2})	Diese Ziele helfen Lösungen im Laufe des Verfahrens auszuwählen.	<ul style="list-style-type: none"> • Bewertung prinzipielle Eignung (Schritt III.b) • Entscheidung vorbereiten (Schritt V.b) 	<ul style="list-style-type: none"> • Konformität mit FDA-Richtlinien (Muss-Ziel) • technisch innovativstes Produkt(system) der Produktklasse
Ressourcennutzungsbezogene Unternehmens-Zielstellungen (Z _{R1})	Diese Ziele sichern die grundsätzliche Übereinstimmung der Lösungen mit ressourcennutzungsbezogenen Unternehmenszielstellungen	<ul style="list-style-type: none"> • Bewertung prinzipielle Eignung (Schritt III.b) • Entscheidung vorbereiten (Schritt V.b) 	<ul style="list-style-type: none"> • Positionierung als umweltfreundliches Unternehmen • geforderte Reduktion der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Energieträgern seitens Kunden • proaktive Absicherung gegenüber künftiger regulatoriver umwelt- / Klimaschutzbezogener Anforderungen an Lösungen
Ressourcennutzungsbezogene Produkt-Zielstellungen (Z _{R2})	Diese Ziele helfen, Lösungen im Laufe des Verfahrens auszuwählen	<ul style="list-style-type: none"> • Bewertung prinzipielle Eignung (Schritt III.b) • Entscheidung vorbereiten (Schritt V.b) 	<ul style="list-style-type: none"> • frei von RoHS-Stoffen • Reduktion des Einsatzes nicht erneuerbaren Rohstoffe • Erhöhung der Lebensdauer
Ökonomische Unternehmens-Zielstellungen (Z _{O1})	Diese Ziele sichern die grundsätzliche Übereinstimmung der Lösungen mit ökonomischen Unternehmenszielstellungen	<ul style="list-style-type: none"> • Bewertung prinzipielle Eignung (Schritt III.b) • Entscheidung vorbereiten (Schritt V.b) 	<ul style="list-style-type: none"> • Positionierung als Innovator • Erschließung eines neuen Marktes • Reduktion der Produktionskosten
Ökonomische Produkt - Zielstellungen (Z _{O2})	Diese Ziele helfen Lösungen im Laufe des Verfahrens auszuwählen	<ul style="list-style-type: none"> • Bewertung prinzipielle Eignung (Schritt III.b) • Entscheidung vorbereiten (Schritt V.b) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduktion des Produktpreises • Positionierung als Leitprodukt

Mittels der sechs Zielkategorien werden einerseits im Schritt III.b RE-Standardlösungen ausgewählt und weiterhin im Schritt V.b geeignete Maßnahmen abgeleitet.

5.1.3 Ergebnisse der Verfahrensphase

Das Ergebnis der Phase I ist die Auswahl des Analysegegenstands sowie die Definition der Unternehmens- und Produkt-Zielstellungen.

5.2 Phase II: Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme

5.2.1 Ziel der Phase II

In Phase II werden für das gewählte Produkt vorhandene Schwachstellen ermittelt und beschrieben sowie produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF) definiert.

5.2.2 Methodisches Vorgehen

Hier wird mit den Schritten *Schwachstellenanalyse* (Schritt II.a) und *Definition PReF* (Schritt II.b) nach Abb. 15 die Grundlage für die konzeptionelle Änderung in der Funktionsrealisierung des Produktes mit der Bestimmung wesentlicher Elemente gebnet.

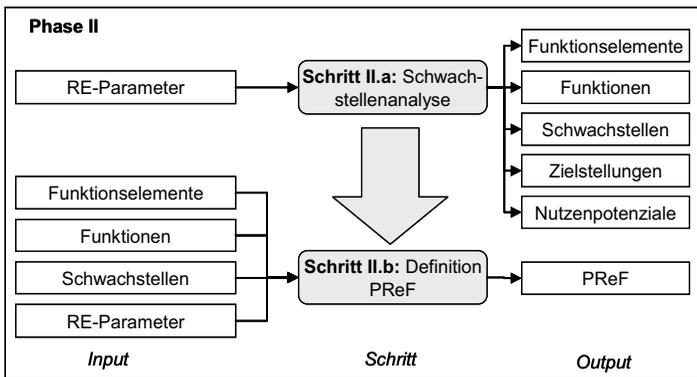


Abb. 15: Schritte von Phase II (Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme)

Dabei gilt es, das in der vorherigen Phase ausgewählte Produkt in der Schwachstellenanalyse zuerst durch Dekomposition zu zerlegen. **Bestimmt** werden die Funktionselemente und produktbezogenen Funktionen. Hierfür werden ressourcenverbrauchsbezogene Schwachstellen in der Nutzungsphase mittels Ressourceneffizienz-Checkliste ermittelt, die anschließend nach der Schwachstellenbeschreibung unter Verwendung des Modellelements RE-Parameter aus Kap. 4.1.3.1 für die Bestimmung der produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF) benötigt werden.

5.2.2.1 Schritt II.a: Schwachstellenanalyse

Das Produkt muss im Rahmen der Schwachstellenanalyse¹¹⁵ in solche Teilelemente und zugehörige Schwachstellen zerlegt werden, die es erlauben, produktspezifische Anforderungen und Analogien mit den abstrakten Lösungsbeschreibungen im Schritt III.a zu generieren.

Dekomposition des Produktes

Bei der Dekomposition wird das Produkt als Analysegegenstand unter Verwendung vorhandener Informationen wie Anforderungsliste und Funktionsstruktur zuerst in funktionelle Elemente wie Baugruppen, Komponenten und Materialien aufgeteilt, mit dem Ziel, die Ele-

¹¹⁵ Die Schwachstellenanalyse ist eine etablierte, qualitative und verbal-argumentative Bewertung der Umweltwirkungsabschätzung (vgl. Schaltegger 2004).

mente auf ein handhabbares Beschreibungsniveau zu bringen.¹¹⁶ Dies stellt die Grundlage für die systematische Produktanalyse im Anschluss dar (vgl. VDI 2000).

Dabei wird das Produkt mittels Funktionsanalyse (vgl. Kap. 3.3.1.2) in die einzelnen Teile **hierarchisch zerlegt** (vgl. Abb. 16). Die Funktionselemente werden von der Gesamtfunktion ausgehend zunehmend konkreter und spezifischer, bis diese als Elementarfunktionen nicht weiter zerlegt werden können. Das Vorgehen orientiert sich an der Frage „Welche Funktion hat das Element?“. Die Strukturierung und Benennung der Funktionselemente (Hauptkomponenten, Teilkomponenten und Materialien) muss aus Gründen der Zweckmäßigkeit abstrakt bleiben, so dass für die Beschreibung der Funktion der nötige Freiraum besteht. Für ein Funktionselement kann es dabei auch mehrere Funktionen geben, die es allerdings aus Gründen der Aufwandsreduzierung meist zu einer Funktion zu kondensieren gilt. Letztendlich muss die praktikable Bewertung in Phase IV des Verfahrens (vgl. Kap. 5.4) ermöglicht werden, bei der die Funktion als Bezugsэлеment von zentraler Bedeutung ist. Bei dem Vorgehen ist also immer zwischen einer handhabbaren Strukturierung und der notwendigen Detaillierung abzuwägen.

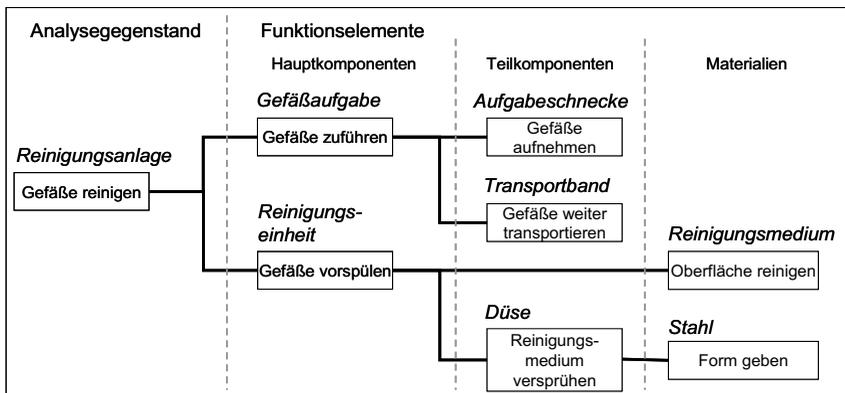


Abb. 16: Funktionslogische Dekomposition am Beispiel einer Reinigungsanlage für Gefäße (in Anlehnung an VDI 1996)

Ermittlung von Schwachstellen in der Nutzungsphase

Hierzu werden **Informationen** zu bekannten ressourceneffizienzbezogenen Problemstellungen des Produktes während der Nutzungsphase gesammelt und aufbereitet.¹¹⁷ Als Informationsquellen und weitere Perspektive müssen insbesondere auch die Erfahrungen seitens anwendender Kunden genutzt werden (vgl. Kap. 3.1.3.2). Daneben sind vorhandene Daten aus Umweltinformationssystemen, Ökobilanzdaten oder sonstiger interner Quellen zu verwenden. Dabei ist auf solche Problemlagen zu fokussieren, die von dem Unternehmen selbst zu beeinflussen sind.

Entsprechende Informationen können **material- oder prozessbezogen** (vgl. Rohn et al. 2009) sein. *Materialbezogen* bezieht sich auf Informationen, die die im Produkt „enthalte-

¹¹⁶ Zur Bestimmung der Produktfunktionen ist das Vorgehen an die VDI-Richtlinie 2803 (VDI 1996) und AKIYAMA (Akiyama 1994) angelehnt. Eine Aufstellung von Funktionen begünstigt eine Vermeidung von Lösungsvorfikrungen und das Finden optimaler Lösungen. Die Aufgabe wird auf das Wesentliche reduziert und die Gesamtfunktion in Teilfunktionen geringerer Komplexität zerlegt.

¹¹⁷ Unter Umständen kann es auch geboten sein, die gewünschten Informationen aus der Perspektive der Chancen zu ermitteln. Dabei stünden Optionen zur Einsparung von Ressourcen im Mittelpunkt.

nen“ Materialien (z. B. Edelstahl) betreffen. *Prozessbezogen* bezieht sich hingegen auf Informationen, die die produktinternen Prozesse während der Nutzung (z. B. Heizen) betreffen.

Für die **strukturierte und gezielte Abfrage** umweltwirkungsbezogener Informationen und speziell zur zielgerichteten Formulierung von Schwachstellen werden Checklisten eingesetzt. Mit der für dieses Verfahren entwickelten Ressourceneffizienz-Checkliste (vgl. Tab. 38, im Anhang, Kap. 10.3.1) können material- und prozessbezogene Schwachstellen formuliert werden.

Bei der Formulierung der Schwachstellen ist **darauf zu achten**, dass sowohl

- das Material (z. B. Stahl) bzw. der Prozess (z. B. Heizen) als auch
- die betroffene Ressourcenkategorie (Material, Energie oder Wasser) deklariert sind und eine
- ressourceneffizienzbezogene Wertung enthalten (z. B. ineffizient oder selten) sind.

Darüber hinaus können bei Bedarf auch zusätzliche wesentliche Aspekte wie Einkaufspreis (z. B. „teuer“) mit aufgenommen werden. Grundsätzlich sind bei der Definition der Schwachstellen immer die Auswirkungen auf alle Ressourcenkategorien zu prüfen. Ist dieser Fall gegeben, müssen für jede Ressourcenkategorie eigene Schwachstellen benannt werden.

Schwachstellenbeschreibung

Die umfassende Erfassung der Problemsituation wird mittels einer weiterentwickelten Form der Innovations-Checkliste durchgeführt.¹¹⁸ Die hier eingesetzte Innovations-Checkliste zur Betrachtung von ressourcenverbrauchsbezogenen Schwachstellen in der Nutzungsphase wird folgendermaßen gegliedert:

a) Informationen zur Schwachstelle: Die Schwachstelle ist **kurz zu beschreiben**, wobei wichtige Ursache-Wirkungs-Beziehungen aufzunehmen sind. Weiterhin ist die zurückliegende Entwicklung des betrachteten Produktes zu beschreiben, z. B. vorangegangene Lösungsversuche zur Behebung der Schwachstelle. Hier ist auch der Grad der erlaubten Änderungen darzustellen. Weiterhin sind interagierende Produkte sowie sonstige wesentliche Zusammenhänge der Produktumgebung aufzuführen.¹¹⁹

b) Einordnung als Standardproblem: Zur Ermittlung des zu einer Schwachstelle passenden RE-Parameters aus Tab. 7 in Kap. 4.1.3.1 gilt es nun, erstens den passenden prinzipiellen Ansatz, zweitens den zu senkenden Ressourcenverbrauch und drittens die relevante Wirkdimension zu definieren. Die für den ersten und zweiten Aspekt benötigten Informationen sind in der Formulierung der Schwachstelle enthalten. Der dritte Aspekt, die Wirkdimension, kann das Funktionselement, das Produkt oder das Produktsystem betreffen. Welche dieser Dimension die relevante und damit zu wählen ist, hängt von der Art der Schwachstelle ab. Handelt es sich um eine Problemstellung von begrenztem Ausmaß und ist auch von einer begrenzten Auswirkung einer neuen Lösung auszugehen, so ist die Dimension auf das Funktionselement bzw. auf das Produkt begrenzt. Ist dies nicht mit Sicherheit zu bestimmen, da etwa mögliche neue Lösungsprinzipien das gesamte Produkt im System der Nutzung betreffen können oder sollen, ist die Dimension Produktsystem zu wählen. Diese beinhaltet wiederum die anderen Dimensionen. Die Auswahl der für die Schwachstelle relevanten Wirkdimension geht auch in die Funktionalitätsbewertung in Schritt IV.a (vgl. Kap. 5.4.2.1) mit ein.

Diese RE-Parameter erlauben die Entwicklung der abstrakten Lösungen in Schritt III.a.

¹¹⁸ Die Innovations-Checkliste dient auch als typische Methode des TRIZ Baukastens (vgl. Gimpel et al. 2000, Herb et al. 1998).

¹¹⁹ Mögliche Fragestellungen sind etwa: Welche Anforderungen müssen erfüllt sein, damit die Funktion des Produkts sichergestellt ist? Unter welchen Umgebungsbedingungen muß das Produkt arbeiten?

c) Anforderungen an Lösungsprinzipien: An dieser Stelle wird festgelegt, wie das gewünschte Endresultat zur Behebung der Schwachstelle aussehen soll und nach welchen Maßstäben die potenziellen technologischen Lösungsprinzipien zu bewerten sind.¹²⁰ Wie bei der **Zielbestimmung** in Schritt I.b gilt es, davon ausgehend funktionale, ressourcennutzungsbezogene und ökonomische Zielstellungen zu bestimmen (Tab. 11). Diese sollten Ansprüche zu der technischen und ökonomischen Umsetzbarkeit wie Wartungs- / Instandhaltungsvorgaben oder einem maximalen Investitionsaufwand beinhalten. Ressourcennutzungsbezogene Forderungen könnten sich auf konkrete Einsparmaßgaben wie hinsichtlich des Energieverbrauchs beziehen. Auch hier sollte eine Differenzierung zwischen Muss- und Kann-Zielen erfolgen. Muss-Ziele ergeben sich aus festen Forderungen, die von neuen Lösungsprinzipien mindestens erfüllt werden müssen, um als Alternative zu existierenden Lösungsprinzipien in Betracht zu kommen. Die Zielkategorien dienen der Nutzenbetrachtung in Schritt V.a.

Tab. 11: Lösungs-Zielstellungen

Zielkategorien	Bedeutungen	Verwendungen	Beispiele
Technische Lösungs-Zielstellungen (Z _{T3})	Diese technischen Anforderungen helfen Lösungsprinzipien im Laufe des Verfahrens auszuwählen und deren Nutzen am Ende des Verfahrens zu bewerten.	Nutzenbetrachtung (Schritt V.a)	<ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen bzgl. Funktionalität und Leistung • Anforderungen bzgl. technischer Instandsetzung oder Steuerungstechnik
Ressourcennutzungsbezogene Lösungs-Zielstellungen (Z _{R3})	Diese ressourcennutzungsbezogenen Anforderungen helfen, den Nutzen der Lösungsprinzipien am Ende des Verfahrens zu bewerten.	Nutzenbetrachtung (Schritt V.a)	<ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen bzgl. einzelner Ressourceneinsparungen (Energie, Material, Wasser) • Anforderungen bzgl. Lebenszyklusphasen • Anforderungen bzgl. Emissionsminderung
Ökonomische Lösungs-Zielstellungen (Z _{O3})	Diese ökonomischen Anforderungen helfen, den Nutzen der Lösungsprinzipien am Ende des Verfahrens zu bewerten.	Nutzenbetrachtung (Schritt V.a)	Anforderungen bzgl. ökonomischer Umsetzbarkeit (z. B. Anlagenrendite unter zwei Jahren)

Neben den Lösungs-Zielstellungen gilt es hier auch das geforderte **ganzheitliche Nutzenpotenzial** zu definieren, das sich aus der technischen Leistung, dem Ressourcenverbrauch und den Kosten des Lösungsprinzips zusammensetzt. Während der Bewertung der Lösungsprinzipien in Phase IV (vgl. Kap. 5.4) werden hierzu konkrete Kennzahlen als quantitative Werte ermittelt. An dieser Stelle gilt es, aus den folgenden möglichen qualitativen Ausprägungen die je Schwachstelle geforderte bzw. erlaubte auszuwählen:

- *Leistung:* Geringer, gleich, höher oder zusätzliche¹²¹
- *Ressourceneffizienz:* Geringer, gleich oder höher
- *Kosten:* Geringer, gleich oder höher

Die erläuterten Gliederungspunkte zur Schwachstellenbeschreibung werden für alle Schwachstellen bearbeitet. Im Falle von vielen identifizierten Schwachstellen können zur

¹²⁰ Dabei sind etwa folgende Parameter zu beachten: technische Eigenschaften, ökonomische Aspekte, zeitliche Vorgaben, Grad der „Neuheit“ des Systems, Erscheinungsbild, Vermarktung, Bedienung, Wartung, Service.

¹²¹ Bei einer zusätzlich ermöglichten Leistung (etwa einer zusätzlichen Funktionalität) sollte die eigentliche adressierte Leistung durch das neue Lösungsprinzip zumindest gleichwertig erfüllbar sein.

Aufwandsreduzierung auch ähnliche (z.B. jene, die zu einem Funktionselement zuzuordnen sind) zusammen betrachtet werden.

5.2.2.2 Schritt II.b: Definition Produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktion

Die erfassten und beschriebenen Schwachstellen werden nun den Funktionselementen samt Funktionen aus der Dekomposition des Produktes zur Bildung von Produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF) zugeordnet. So ergibt z. B. die Kombination der Schwachstelle „Energieineffiziente Erzeugung heißer Luft im Heizteil“ und der gewählte RE-Parameter *prozessbezogener Energieverbrauch im Produkt* (PEP) mit der Funktion „Gefäße trocknen“, des Funktionselements „Heizteil“ eine PReF (in Abb. 17 die RPeF_{1a}) des betrachteten Produktes „Trocknungsanlage“. Die PReF beinhaltet alle zentralen, bisherigen beschreibenden Elemente (Beschreibungselemente) des Produktes und hat somit eine besondere Bedeutung in dem Verfahren. Hiermit kann eine lösungsneutrale Beschreibung der spezifischen Ressourcenverbrauchspotenziale während der Nutzungsphase eines Produktes (**Problembeschreibung**) erbracht werden (vgl. Kap. 4.1). Sind hierbei für eine Schwachstelle mehrere Zuordnungen zu unterschiedlichen Funktionselementen denkbar, müssen solche Mehrfachzuordnungen entsprechend aufgenommen werden (vgl. Abb. 17).

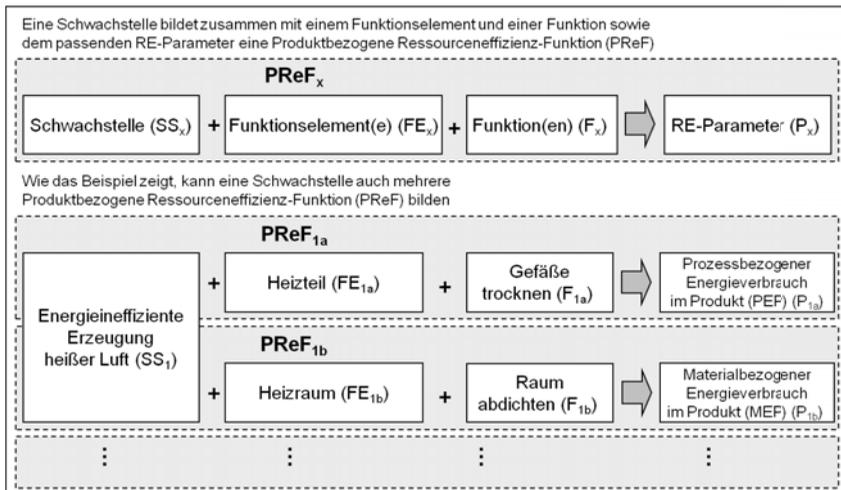


Abb. 17: Beschreibungselemente zur Bildung einer oder mehrerer PReF

5.2.3 Ergebnisse der Verfahrensphase

Ergebnisse der Verfahrensphase II sind die definierten Schwachstellen, die Schwachstellenbeschreibungen samt Anforderungen an Lösungsprinzipien und die Produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF).

5.3 Phase III: Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen

5.3.1 Ziel der Phase III

Das Finden geeigneter Lösungen ist der entscheidende Schritt im Problemlösungsprozess (VDI 1997). In dieser Phase werden für die erarbeiteten PReF (bzw. enthaltenen Schwachstellen) mögliche neue technologische Lösungsprinzipien mit Ressourceneffizienzpotenzial gesucht.

5.3.2 Methodisches Vorgehen

Dabei wird aufbauend auf den ermittelten PReF aus Phase II mit der Definition abstrakter prinzipiell geeigneter Lösungen (Schritt III.a) begonnen. Im Anschluss daran werden die favorisierten Lösungen als Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (TReF) beschrieben (Schritt III.b). Unter Einbeziehung externer Experten werden dann für diese TReF neue ressourcenverbrauchslenkende **Lösungsprinzipien** aus dem Bereich der emergenten Technologien gesucht (Schritt III.c). Abb. 18 gibt einen Überblick zu Schritten und zentralen Definitionen bzw. Ergebnissen.

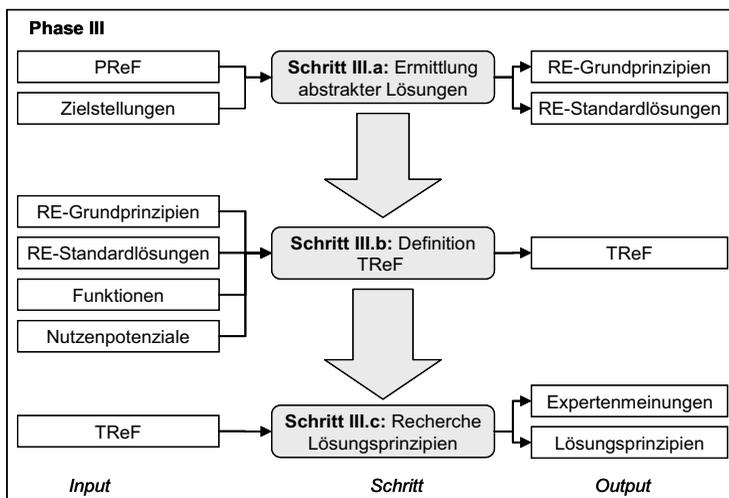


Abb. 18: Schritte von Phase III (Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen)

5.3.2.1 Schritt III.a: Ermittlung abstrakter Lösungen

Hier werden aufbauend auf den zuvor definierten PReF passende RE-Standardlösungen ermittelt. Dabei kommen die in Kap. 4.1.3.2 beschriebenen RE-Grundprinzipien zum Einsatz. Ziel ist es, alternative RE-Standardlösungen zu definieren, die potenzielle technologische Ansätze für Lösungen zur Verbesserung der Ressourceneffizienz des Produktes darstellen.

Definition der RE-Grundprinzipien

Für die abstrakte Lösungsbeschreibung müssen für alle zu einer PReF zugeordneten RE-Parameter mittels Tab. 37 in Kap. 10.2.1 die passenden RE-Grundprinzipien *Substitution von Ressourcenarten (GP1), Steigerung der Effizienz (GP2), Minderung von Abfall / Ausschuss, (GP3), Verlängerung der Lebensdauer (GP4) oder Optimierung der Kreislauffähigkeit (GP5)* ausgewählt werden. So passen zu dem *prozessbezogenen Energieverbrauch im Produkt (PEP)* die Grundprinzipien GP2 und GP5. Diese Überführung dient dem ersten Aufzeigen von möglichen Optionen zur Umsetzung von Ressourceneffizienz im Produkt.

Definition der RE-Standardlösungen

Nun werden für jede PReF samt ermittelten RE-Grundprinzipien denkbare RE-Standardlösungen per Analogiebildung als abstrakte Lösungen definiert. Tab. 9 in Kap. 4.1.4 zeigt hierzu die für die ermittelten RE-Grundprinzipien jeweils passenden RE-Standardlösungen. Ein Beispiel findet sich in Tab. 13.

Bewertung prinzipielle Eignung

Um den späteren Rechercheaufwand zu reduzieren, werden in diesem Schritt die einzelnen RE-Standardlösungen hinsichtlich ihrer prinzipiellen Eignung qualitativ mittels ABC-Analyse¹²² bewertet, verglichen und für das weitere Vorgehen ausgewählt. Die **Problemlöseignung** ergibt sich aus den in Tab. 12 dargestellten zwei Kriterien *Anwendbarkeit* und *Konformität* mit formulierten Zielstellungen.

Informationsgrundlage für diese qualitative Bewertung ist die Dokumentation zu Zielstellungen in Schritt I.a. Zudem können für die Bewertung der *Anwendbarkeit* die Beschreibungen der RE-Standardlösungen in Tab. 6 in Kap. 4.1.2 genutzt werden. Darüber hinaus kann aus weiteren Informationsquellen explizites Wissen in Form von Primär- und Sekundärliteratur wie z. B. Technologie-Studien, Roadmaps, Forschungsberichte sowie Patente und Datenbanken im Internet mit einbezogen werden.

Anhand dieser ersten Grobbewertung gilt es **Lösungen auszuschließen**, die unter prinzipiellen Gesichtspunkten nicht realisierbar erscheinen. Insbesondere bei der Prüfung von festen Forderungen (Muss-Zielen) sollte die Konformität gesichert sein.

Tab. 12: Bewertung der prinzipiellen Eignung der RE-Standardlösungen

Kriterium für Eignung	Fragestellung	Bewertung	Bewertungsindikatoren
Anwendbarkeit (A _{SL})	Ist die prinzipielle Anwendbarkeit der RE-Standardlösung im Produkt gegeben?	A (3 = ja / denkbar); B (1 = unklar); C (0 = nein)	z. B. vorhandene Erfahrungen und Expertisen im Unternehmen
Konformität (C _{SL})	Stimmt die RE-Standardlösung prinzipiell mit den Zielstellungen des Unternehmens überein?	A (3 = ja / denkbar); B (1 = unklar); C (0 = nein)	Unternehmens- und Produkt-bezogene Zielstellungen aus Schritt I.b (Z _{T1} , Z _{R1} , Z _{O1} , Z _{T2} , Z _{R2} , Z _{O2})

Die prinzipielle Eignung (E) jeder RE-Standardlösung (SL) für eine PReF berechnet sich aus dem Produkt der Werte für die Anwendbarkeit (A) und der Konformität (C) (siehe Formel 3). Gilt eines der Kriterien als nicht erfüllt, so nimmt die prinzipielle Eignung den Wert Null an. Die zwei Kriterien werden grob anhand der Kategorien „ja“ (Eignung ist prinzipiell nach dem Kenntnisstand gegeben), „unklar“ (Eignung ist nach dem Kenntnisstand unklar, weil z. B. Informationen fehlen oder Rückfragen bestehen) oder „nein“ (prinzipielle Eignung ist nach dem Kenntnisstand nicht gegeben) abgeschätzt.

$$E_{SL} = A_{SL} \cdot C_{SL}$$

(mit E: Eignung, A: Anwendbarkeit, C: Konformität, Indizes: SL: RE-Standardlösung)

Formel 3: Berechnung der prinzipiellen Eignung einer RE-Standardlösung für eine PReF

Mit dieser Bewertung wird jeder RE-Standardlösung ein Wert zugeordnet, dessen Höhe die Eignung widerspiegelt und so eine geeignete Auswahl ermöglicht (Tab. 13).

¹²² Die ABC-Analyse ist eine qualitative, relativ abstufende Bewertungsmethode, die auch argumentative Aspekte enthält. Dabei werden die Bewertungsobjekte nach ihren Auswirkungen bezogen auf gewählte Kriterien, abstuft nach einem Klassifizierungsschema geordnet. Allgemein, steht die Klasse A dabei für dringenden Handlungsbedarf, während eine Zuordnung zu Klasse C keinen Handlungsbedarf vorsieht (vgl. Ulmschneider 2006).

Tab. 13: Beispiele für die Bewertung und Auswahl der RE-Standardlösungen

PReF	Mögliche RE-Standardlösungen	Prinzipielle Eignung (E) und Begründung	Geeignete RE-Standardlösungen
Energieineffiziente Erzeugung heißer Luft / Heizeil / Gefäße trocknen / prozessbezogener Energieverbrauch im Produkt (PEP) (PReF _{1a} aus Abb. 17)	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenfunktionalisierung • Flexibilisierung • Systemabschluss • Energieautarkie 	3 (prinzipielle Anwendbarkeit unklar, aber Einsparpotenziale möglich)	<ul style="list-style-type: none"> • Steuerung • Alternative Wirkprinzipien
	<ul style="list-style-type: none"> • Multifunktionalität • Miniaturisierung • Bionik • Leichtbau 	0 (ist wegen vorgegebener Baustruktur schwer anwendbar)	
	<ul style="list-style-type: none"> • Steuerung • Alternative Wirkprinzipien 	9 (Steuerung und alternative Wirkprinzipien bieten hohe Energieeinsparpotenziale und eine Anwendbarkeit ist denkbar)	

Auf Basis dieser Bewertung wird der Lösungsraum auf ein handhabbares Level fokussiert und es können die prinzipiell am besten geeigneten RE-Standardlösungen weiter verfolgt werden.

5.3.2.2 Schritt III.b: Definition Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktion

Damit im Folgenden passende Lösungsprinzipien identifiziert werden können, ist es notwendig, eine Beschreibungsform zu definieren – die Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktion (TReF). Diese erlaubt entsprechend der Produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktion (PReF), die mit der Problembeschreibung im Produkt existierende Ressourcenverbrauchspotenziale vergleichbar macht, die schematische Beschreibung von Ressourceneffizienzpotenzialen (**Lösungsbeschreibung**) von Technologien (vgl. Abb. 19). Die nun vorliegenden PReF-TReF-Kombinationen erlauben eine kondensierte Beschreibung der Ergebnisse und Festlegungen im Rahmen des abstrakten Problemlösungsweges mit der Funktion im Zentrum zur Identifikation hierzu passender konkreter Lösungsprinzipien.

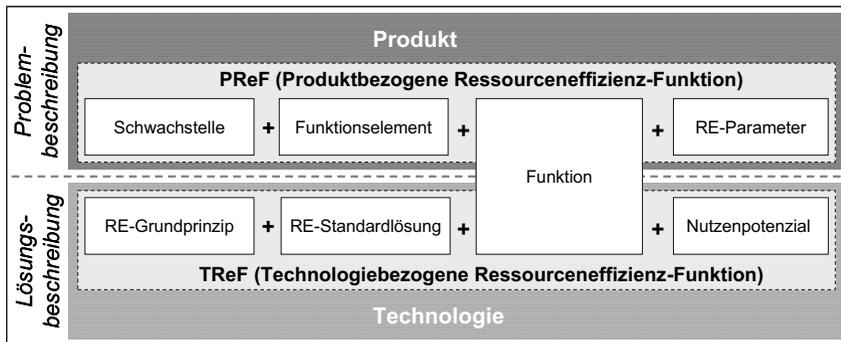


Abb. 19: Bezug der Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktion (TReF) mit einer passenden Produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktion (PReF)

Die für die **Definition der TReF** zu bestimmenden Beschreibungselemente sind zum einen das in der Schwachstellenbeschreibung in Schritt II.a gewählte Nutzenpotenzial und die in der Dekomposition ermittelte Funktion (vgl. Kap. 5.2.2.1), wobei letztere hier das verknüpfende Element zwischen Produkt und Technologie darstellt (vgl. Kap. 3.3.1.1). Zum anderen sind die in dieser Phase bereits ermittelten RE-Grundprinzipien und RE-Standardlösungen relevant. Ein Beispiel für eine TReF wäre „Substitution von Ressourcen / Leichtbau / Dämmung leisten / gleiche Leistung, höhere Ressourceneffizienz und gleiche Ten“ (vgl. Abb. 21 in Kap. 5.3.3).

5.3.2.3 Schritt III.c: Recherche Lösungsprinzipien

Die Recherche nach neuen Lösungsprinzipien aus dem Feld der emergenten Technologien ist relativ anspruchsvoll, da anders vorgegangen werden muss als bei der Suche nach bereits etablierten Lösungsprinzipien (z. B. Stand der Technik). Erforderlich ist ein offener Ansatz, bei dem verschiedene interne und externe Informationsquellen (speziell Experten) genutzt werden, da hierdurch ermöglicht wird, die außerhalb des Wissensbereichs des Unternehmens liegenden Informationen einzubinden. **Ausgangspunkt** für die Recherche passender Lösungsprinzipien sind die ausgewählten TReF, die den favorisierten Lösungskorridor zu den entsprechenden PReF darstellen.

Identifikation der Experten

Geeignete Experten müssen einschlägiges anwendungsbezogenes Wissen besitzen und für den jeweiligen **Kompetenzbereich** einen breiten Überblick über bekannte Lösungsprinzipien haben. Zudem werden Kompetenzen zur Abschätzung von funktionalen, ressourceneffizienzbezogenen und kostenbezogenen Erfüllungsgraden (ganzheitlicher Nutzen) der Lösungsprinzipien in der Anwendung benötigt (vgl. Kap. 3.2.1.3). Darüber hinaus sollten die Experten beurteilen können wie eine Umsetzung im Produkt gegebenenfalls gestaltet sein könnte. Durch die Auswahl und Einbindung der Experten wird das Domänenwissen (Wissen über ein Anwendungsgebiet) der einzelnen Fachdisziplinen in den Bewertungsprozess eingespeist.

Grundlage für die Expertenidentifikation sind Primär- und Sekundärquellen, die hinsichtlich relevanter Informationen zu Technologieexperten für einzelne TReF ausgewertet werden. Die Anzahl der Experten sollte auf eine handhabbare Größe beschränkt werden. Anhand einer Bewertung deren Kompetenzgrades („eher klein“, „mittel“, „eher groß“) wird überprüft, ob für alle PReF-TReF-Kombinationen Experten gefunden wurden bzw. welche Aussagekraft die Informationen der Experten haben.

Identifikation der Lösungsprinzipien

Die **Auswertung** von Quellen bezieht implizites Wissen, das über die identifizierten Experten gewonnen wird, und explizites, d. h. in Dokumenten verfasstes Wissen mit ein. Das Wissen der Experten wird durch schriftliche Befragung oder durch Interviews erfasst. Anhand eines Interviewleitfadens oder Fragebogens werden systematisch die benötigten Informationen erhoben. Für die Erhebung expliziten Wissens können etwa Patent-, Projektdatenbanken und Technologiestudien genutzt werden.

Da sich die Auswertung von implizitem und explizitem Wissen gegenseitig bedingt, sollten entsprechende Aktivitäten in einem **diskursiven Prozess** ablaufen. Gegebenenfalls kann es zunächst geboten sein, sich einen Überblick durch Internetrecherche und Auswertung der vorhandenen Literatur zu verschaffen, um anschließend mit bekannten oder neu identifizierten Experten Interviews durchzuführen und parallel gezielt nachzurecherchieren.

Für die identifizierten relevanten Lösungsprinzipien müssen die relevanten Informationen abschließend zusammengetragen und dokumentiert werden. Dazu dient der in Abb. 20 dargestellte **Steckbrief**, welcher die umfassende Beschreibung eines Lösungsprinzips und damit einen ersten Vergleich zwischen alternativen Lösungsprinzipien erlaubt.

Nr. des Lösungsprinzips		L1		
Nr. des Lösungsprinzips	L1			
Betrachtungsaspekte	Beschreibung			
Referenzlösungsprinzip (aktuell angewendetes Lösungsprinzip)	Stahlwand			
Analysegegenstand	Trocknungstunnel			
PREF	Schwachstelle	Funktionselement	Funktion	Ressourceneffizienz-Parameter
	Die Stahlwandstruktur führt zu einem Energieverlust	Stahlwand	Dämmung leisten	materialbezogener Energieverbrauch im Produkt (MEP)
TREF	RE-Grundprinzipien	RE-Standardlösungen	Funktion	Nutzenpotenzial (Leistung; Ressourceneffizienz; Kosteneinsparung)
	Substitution von Ressourcen	Leichtbau	Dämmung leisten	gleich; höher; gleich
Kontakt und Kompetenzbewertung Experte	Nano-Dämm GmbH			
Bild des Lösungsprinzips				
Name des Lösungsprinzips	Aerogel			
Lösungsprinzip	Dämmmaterial			

Abb. 20: Beispiel für die Beschreibung von Lösungsprinzipien mittels Steckbrief

5.3.3 Ergebnisse der Verfahrensphase

Die Ergebnisse der Verfahrensphase III umfassen die Lösungsbeschreibungen durch die Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktion (TReF), eine Auswahl geeigneter Experten und die Beschreibung prinzipiell relevanter Lösungsprinzipien. In Abb. 21 ist der schematische **Problemlösungsprozess** von der Definition der Schwachstelle bis zur Identifikation eines Lösungsprinzips im Überblick dargestellt (vgl. Beispiel aus Abb. 20 im vorherigen Kap.).

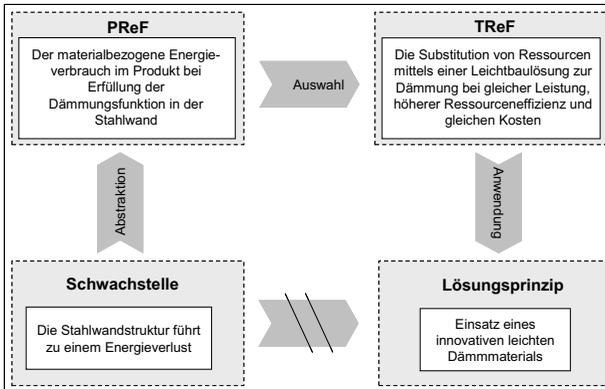


Abb. 21: Schematischer Problemlösungsprozess mit beispielhafter Bestimmung eines Lösungsprinzips für eine Trocknungsanlage

5.4 Phase IV: Ganzheitliche Bewertung der Lösungen

5.4.1 Ziel der Phase IV

Die in der vorherigen Phase ermittelten Lösungsprinzipien mit Ressourceneffizienzpotenzial spannen den favorisierten Lösungsraum auf. Diese Verfahrensphase dient dazu, die Brauchbarkeit der einzelnen Lösungsvorschläge für die Anwendung im Bezugssystem (das gewählte Produkt in der Nutzungsphase) zu prüfen (vgl. Abb. 11 im Kap. 4).

Der **Zuschnitt der Bewertung** ist dabei auf die Perspektive eines Herstellers ausgerichtet, der mit dem Ergebnis die verbesserte Performanz seines Produktes in Form eines höheren ganzheitlichen Nutzens für den Anwender erreichen will.

5.4.2 Methodisches Vorgehen

Die erforderliche **dreidimensionale Bewertung** (Funktionalität, Ressourceneffizienz und Ökonomie) der Lösungsprinzipien wird integriert durchgeführt. Als Referenzen dienen jeweils die aktuell im Produkt implementierten Lösungsprinzipien (Referenzlösungsprinzipien).

Die Funktionalität der Lösungsprinzipien wird mittels der Methode House of Technology bewertet (Schritt IV.a). Die Ressourceneffizienz wird anhand des Ressourcenverbrauchs (MIPS-Methode) und des zukünftigen Ressourcenbedarfs basierend auf der Szenario-Technik beurteilt (Schritt IV.b). Der lebenszyklusweite ökonomische Aufwand wird in Schritt IV.c mittels Kapitalwertmethode bewertet. In allen Schritten ist die enge Zusammenarbeit mit den identifizierten Experten vorgesehen. Die durchzuführenden Schritte und zu erzielenden Ergebnisse sind in Abb. 22 zur Übersicht dargestellt.

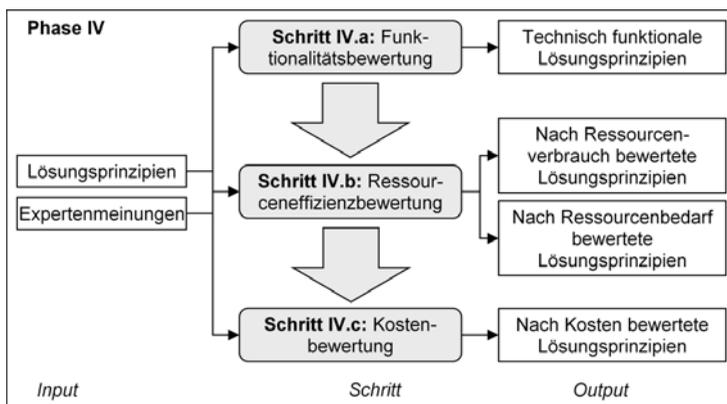


Abb. 22: Schritte von Phase IV (Ganzheitliche Bewertung der Lösungen)

Die Anforderung der Ganzheitlichkeit verlangt die Beachtung folgende **Aspekte** (vgl. Atik 2001, Ritthoff et al. 2002, Oberender 2006):

1. die gezielte *Berücksichtigung der relevanten Lebenszyklusphasen* (vgl. Kap. 3.3.2.2)
2. die Zurverfügungstellung von *Daten* (vgl. Kap. 3.2.2)
3. die Verwendung geeigneter *repräsentativer Kennzahlen*

Bzgl. der **relevanten Lebenszyklusphase** steht bei allen drei Dimensionen stets die Nutzungsphase als primäre Bilanzierungsgrenze im Mittelpunkt (vgl. Abb. 11 in Kap. 4). Darüber hinaus gilt es in Abhängigkeit der jeweiligen Bewertungsdimension und Perspektive (*eigene* als Hersteller und die des *Kunden* als potenzieller Anwender) zusätzlich relevante Lebens-

zyklusphasen aufzuzeigen.¹²³ Anwender haben eine vorrangig nutzungsphasenorientierte Sichtweise, wohingegen Hersteller aufgrund der Produktverantwortung (vgl. Kap. 3.1.3.1) ihr Augenmerk z. T. auch auf vor- und nachgelagerte Phasen richten müssen.

Bei der Funktionalitätsbewertung ist die Berücksichtigung der Nutzungsphase ausreichend, da hier die Funktionalität des alternativen Lösungsprinzips in der Anwendung im Mittelpunkt steht. Dabei können zwar auch weitere Fragestellungen etwa bzgl. der Fertigung (also vorgelagerte Lebenszyklusphase) von Interesse sein. Diese sind jedoch nicht Bestandteil des Verfahrens.

Bei der Ressourceneffizienzbewertung ist die Berücksichtigung der Nutzungsphase nicht in jedem Fall ausreichend, da der Ressourcenverbrauch eines Lösungsprinzips speziell aus Herstellersicht auch in anderen Lebenszyklusphasen (z. B. Herstellung) wesentlich sein kann (vgl. Ausführungen in den Kap. 3.1.4.2 und 3.3.2.2).

Bei der Kostenbewertung ist ebenfalls der Lebenszyklusbezug relevant, da etwa eine neue Technologie häufig mit größeren Investitionskosten als eine konventionelle Technologie behaftet ist, dann aber über einen längeren Zeitraum der Anwendung etwa gewisse Kostenvorteile¹²⁴ bieten kann (vgl. Kap. 3.1.3.2 und 3.2.2). Über die Realisierung des ökonomischen Potenzials in der Nutzungsphase hinaus haben Hersteller und Anwender entsprechend ihrer Funktion im Lebenszyklus ein Interesse Kosten zu minimieren (vgl. Kap. 3.1.3.2). So ist das Recycling eher für den Anwender bedeutend, es sei denn, es bestehen Rücknahmeverpflichtungen seitens der Hersteller.

Für die Bewertung werden eine Reihe unterschiedlicher lebenszyklusbezogener **Daten** benötigt.¹²⁵ Diese gilt es, dort, wo Daten fehlen, neu zu bestimmen (prioritär), zu recherchieren oder ggf. mittels Vergleichswerten abzuschätzen.

Darüber müssen neben der zu leistenden qualitativen Bewertung auch **repräsentative Kennzahlen** für die drei Dimensionen definiert werden, um eine direkte und übersichtliche Vergleichbarkeit der Lösungsprinzipien mit den Referenzlösungsprinzipien und untereinander zu vereinfachen. Hierzu eignen sich der Leistungswert (z. B. kW, vgl. Kap. 5.4.2.1), der Ressourcenverbrauchswert (z. B. in kg, vgl. Kap. 5.4.2.2) und der Kostenwert (z. B. in €, vgl. Kap. 5.4.2.3), welche stets auf die zu erfüllende Funktion im Produkt bezogen sind (vgl. Kap. 5.2.2.1). *Hierdurch lässt sich das ganzheitliche Nutzenpotenzial eines Lösungsprinzips quantitativ beschreiben.*

Die geschilderten **Anforderungen** zu den drei Aspekten sind in Tab. 40 im Anhang zusammengefasst dargestellt.

5.4.2.1 Schritt IV.a: Funktionalitätsbewertung

Die Funktionalitätsbewertung der Lösungsprinzipien erfolgt in Anlehnung an das **House of Technology** (HoT) (Bullinger et al. 2003). Funktionalität wird hier im Sinne der technischen Problemlösungsrelevanz bzw. Attraktivität (vgl. Kap. 3.2.1.2) einzelner identifizierter Lösungsprinzipien für die jeweilige produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktion (PReF) verstanden. Dabei erfüllt die Funktionalitätsbewertung der Lösungsprinzipien auch eine wichtige Aufgabe zur Begrenzung des Lösungsraums, da technisch unpassende Lösungsprinzi-

¹²³ Die Perspektive des Anwenders wird hier mit aufgeführt, da diese vom Hersteller berücksichtigt werden muss, um ermöglichte Vorteile bzw. vermiedene Nachteile an den anwendenden Kunden vermitteln zu können.

¹²⁴ Beispielsweise senken niedrigere Verbrauchskosten in der Betriebsphase und das hohe Maß an Werterhalt die Gesamtkosten.

¹²⁵ Häufig stehen diese nicht im befriedigenden Maße oder ausreichender Qualität zur Verfügung (vgl. Kap. 3.2.3.2). Aus diesem Grund kommen in diesem Verfahren nur solche Methoden zum Einsatz, die mit unterschiedlichen Datenverfügbarkeiten (z. B. größere Datenlücken) anwendbar sind und stets ausreichend valide Ergebnisse liefern.

gien identifiziert werden und daher nicht weiter verfolgt werden brauchen. Das HoT wird wie folgt aufgebaut (Abb. 23):

- In den *Zeilen* werden die definierten PReF aus Schritt II.b aufgelistet.
- In der *ersten Spalte* „Gewichtung“ wird die Wichtigkeit der einzelnen PReF eingeschätzt.
- In den *Spalten* werden die im vorherigen Schritt identifizierten Lösungsprinzipien eingetragen. Die Wertzuordnung der Funktionalität erfolgt in der Kreuzung von Zeile und Spalte. So lassen sich beispielsweise einzelne PReF durch mehrere Lösungsprinzipien abbilden. Umgekehrt kann ein Lösungsprinzip zur Erfüllung mehrerer PReF dienen.
- Das *Dach* zeigt im Verschränkungsfield für zwei Spalten die Korrelation von mehreren Lösungsprinzipien für eine PReF an. So können sich ausgewählte Lösungsprinzipien entweder gegenseitig verstärken, abschwächen oder neutral zueinander verhalten. Mit der Korrelation kann die Integrations- und Kombinationsfähigkeit der Lösungsprinzipien abgebildet werden. Beispielsweise können so kritische Lösungsprinzipien identifiziert und anschließend gezielt durch alternative Lösungsprinzipien substituiert werden.

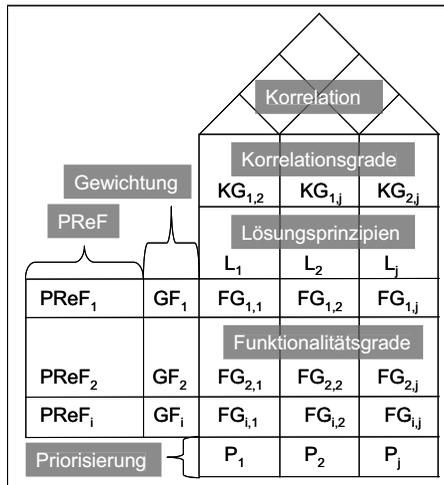


Abb. 23: House of Technology zur Bewertung der Funktionalität aller Lösungsprinzipien

Berechnung der Funktionalitätsgrade der Lösungsprinzipien

Der **Funktionalitätsgrad** (FG) jedes einzelnen Lösungsprinzips für die Erfüllung einer PReF wird wie in Schritt III.b mittels ABC-Analyse bestimmt. Die benötigten Kriterien sind Funktionserfüllung und Kompatibilität (vgl. Tab. 14).

Tab. 14: Bewertung des Funktionalitätsgrads der Lösungsprinzipien

Kriterium für Eignung	Fragestellung	Bewertung	Informationsgrundlagen
Funktionserfüllung (F _L)	Ist die Funktionserfüllung des Lösungsprinzips für die zugehörige PReF (inkl. aller Elemente) gegeben?	A (3 = ja / denkbar); B (1 = unklar); C (0 = nein)	<ul style="list-style-type: none"> • Dokumentation aus Schritt II.a und III.c sowie vorhandenen Erfahrungen im Unternehmen • Expertenmeinungen
Kompatibilität (K _L)	Ist das Lösungsprinzip prinzipiell geeignet, in dem Produkt(system) mit vertretbarem Aufwand angewendet zu werden (z. B. aufgrund ausreichenden technologischen Reifegrades, geringer Eingriffstiefe)?	A (3 = ja / denkbar); B (1 = unklar); C (0 = nein)	<ul style="list-style-type: none"> • Dokumentation aus Schritt III.c und vorhandenen Erfahrungen im Unternehmen • Expertenmeinungen

Der Funktionalitätsgrad (FG) (vgl. Abb. 23) jedes einzelnen Lösungsprinzips (L) für die zugehörige PReF **berechnet** sich aus dem Produkt der Werte für die Funktionserfüllung (F), und der Kompatibilität (K) (siehe Formel 4). Ist eines der Kriterien durch das Lösungsprinzip nicht erfüllbar, so nimmt der Funktionalitätsgrad den Wert Null (=0) an. Dies ist etwa der Fall, wenn die Funktion eines Funktionselements durch ein Lösungsprinzip technisch nicht realisierbar ist oder die technologische Entwicklung noch zu sehr im Forschungsstadium zu sein scheint. Solche Lösungsprinzipien werden nicht weiter betrachtet (wodurch der Lösungsraum verkleinert wird).

Die drei Kriterien werden grob anhand der Kategorien „ja“ (Funktionalität ist prinzipiell nach dem Kenntnisstand gegeben), „unklar“ (Funktionalität ist nach dem Kenntnisstand unklar, weil z. B. Informationen fehlen oder Rückfragen bestehen) oder „nein“ (Funktionalität ist nach dem Kenntnisstand nicht gegeben) abgeschätzt und mit einem Wert versehen (Tab. 14).

$$FG_{PReF,L} = F_{PReF,L} \cdot K_{PReF,L}$$

(mit FG: Funktionalitätsgrad, F: Funktionserfüllung, K: Kompatibilität, Indizes: PReF: Produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktion, L: Lösungsprinzip)

Formel 4: Berechnung des Funktionalitätsgrads eines Lösungsprinzips

Mit der Berechnung des Funktionalitätsgrades (FG) wird ein **Vergleich** von alternativen Lösungsprinzipien mit der gleichen Funktion ermöglicht. Es können auch im Falle mehrerer passender Funktionen eines Lösungsprinzips die jeweiligen Funktionalitätsgrade für entsprechende PReF dargestellt werden.

Berechnung der Korrelation der Lösungsprinzipien

Des Weiteren sind die Korrelationen zwischen Lösungsprinzipien zu ermitteln. Dabei wird überprüft, wie einzelne Lösungsprinzipien mit anderen technisch **zusammenwirken**. Oft liegen Korrelationen vor, bei der die Erfüllung eines Lösungsprinzips ein anderes behindert (vgl. VDI 2000). Beispielsweise könnte der Fall vorliegen, dass eine neue Heiztechnologie wie „Mikrowellen“ aus betriebstechnischer Sicht nicht gleichzeitig mit einem Material wie „Aluminiumschaum“ – welches ein anders Lösungsprinzip für eine andere PReF darstellt – im selben Funktionselement realisiert werden kann. Andererseits können sich Lösungsprinzipien aber auch technisch sinnvoll ergänzen.

Die Korrelation der einzelnen Lösungsprinzipien untereinander wird als **Korrelationsgrad** (KG) mittels Korrelationsmatrix bestimmt. Hierfür werden die Beziehungen der Lösungsprinzipien aus dem Dach des HoT aus Abb. 23 in die Zeilen sowie Spalten einer Matrix eingetragen (vgl. Abb. 24). Für eine positive Auswirkung (unterstützend) zweier Lösungsprinzipien wird das Symbol „+“ eingesetzt und der zugehörige Korrelationsfaktor (der kann die Zahlen-

werte 0,8, 1,0 oder 1,2 annehmen kann) als positive Gewichtung determiniert. Wenn die Bewertungsgrundlagen noch unzureichend sind oder eine neutrale Beeinflussung angenommen wird, dann wird die Kombination mit dem Symbol „0“ und dem Korrelationsfaktor 1 bewertet. Wird eine Kombination von zwei Lösungsprinzipien als sich gegenseitig ausschließend angesehen, wird diese mit dem Symbol „-“ und dem Korrelationsfaktor 0,8 bewertet. Für neutrale Korrelationen ergibt sich als Korrelationsfaktor der Wert 1,0. Da sich die einzelnen Lösungsprinzipien nicht selber beeinflussen, werden derartige Korrelationen ausgeblendet, wie in Abb. 24 durch die freien Felder dargestellt.

Zur Berechnung des Korrelationsgrades aus der Summe der einzelnen Korrelationsfaktoren eines Lösungsprinzips findet schließlich eine Normierung der Zeilensumme statt. Sie entstehen durch Division der Zeilensummen durch die Anzahl der Zeilenwerte in der Matrix. Sind die Werte größer 1,0, so zeigt dies, dass es sich um eine positive Korrelation handelt; umgekehrt ergibt sich eine negative Korrelation, wenn die Werte kleiner 1,0 sind.

Lösungsprinzip	Lösungsprinzip			Summe	Summe normiert
	L ₁	L ₂	L ₃		
L ₁	1,2	0,8	2,0	1	
L ₂	1,2	1	2,2	1,1	
L ₃	0,8	1	1,8	0,9	

Abb. 24: Ermittlung von Korrelationsgraden für beispielhafte Beziehungen einzelner Lösungsprinzipien

Letztendlich dient die Bestimmung der Korrelation eines Lösungsprinzips mit alternativen Lösungsprinzipien dazu, mögliche **Kombinationsmöglichkeiten** ausloten zu können.

Berechnung der Priorität eines Lösungsprinzips

Die **Priorität** (Pr) eines einzelnen Lösungsprinzips wird mit dem Produkt aus Funktionalitätsgrad (FG), dem Gewichtungsfaktor (GF) und dem Korrelationsgrad (KG) berechnet (vgl. Formel 5). Der Gewichtungsfaktor (GF) einer PReF bestimmt sich dabei aus der Wichtigkeit dieser im Vergleich zu den anderen PReF des Lösungsprinzips und liegt bei „1“ (weniger wichtig) „2“ (mittel wichtig) oder „3“ (sehr wichtig).

$$Pr_L = \sum_{j=1}^n (GF_{PReF_i} \cdot FG_L) \cdot KG_L$$

(mit Pr: Priorität, FG: Funktionalitätsgrad, GF: Gewichtungsfaktor, KG: Korrelationsgrad, Indizes: PReF: Produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktion, L: Lösungsprinzip, i: Laufindize)

Formel 5: Berechnung der Priorität eines Lösungsprinzips

Damit ist jedem Lösungsprinzip ein Wert, der die Priorität widerspiegelt, zugeordnet und im Vergleich mit den anderen Lösungsprinzipien ein Ranking erlaubt.

Bestimmung der Leistung eines Lösungsprinzips

Abschließend wird der *Leistungswert* eines Lösungsprinzips bestimmt. Er gilt als die *repräsentative Kennzahl* der Dimension Funktionalität (vgl. Kap. 5.4.2). Hierfür ist die von dem Lösungsprinzip in der Anwendung im Produkt zu erwartende Leistung (vgl. Kap. 3.2.1.2) be-

zogen auf die zu erfüllende Funktion festzulegen. Der erwartete Leistungswert (P) der Technologie „Infrarot“ zur Erfüllung der Funktion „Gefäße trocknen“ kann beispielsweise als elektrische Leistung 15 kW betragen.

Zusammenfassung der Bewertung der Funktionalität eines Lösungsprinzips

Die Bewertung der Funktionalität eines Lösungsprinzips erfolgt mit der Berechnung der Priorität (basierend auf dem Funktionalitätsgrad und der Korrelation mit anderen Lösungsprinzipien) und der Bestimmung der Kennzahl *Leistungswert* (P).

5.4.2.2 Schritt IV.b: Ressourceneffizienzbewertung

In diesem Schritt werden die identifizierten Lösungsprinzipien hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz bewertet. Die Ressourceneffizienz eines Lösungsprinzips wird hier vereinfacht aus dem **Ressourcenverbrauch** (Intensität des Gebrauchs von Ressourcen in der Anwendung) sowie dem **künftigen Ressourcenbedarf** (prognostizierbare Versorgungssituation mit Ressourcen) des Lösungsprinzips bestimmt. Zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs wird in diesem Schritt die MIPS-Methode (vgl. Kap. 3.2.3.2.2) in angepasster Form eingesetzt. Dabei wird die Intensität des Gebrauchs der betrachteten Ressourcen als Material-Input bewertet und als eine aggregierte Kennzahl (MIPS) dargestellt (vgl. Kap. 5.4.2). Der künftige Ressourcenbedarf wird mittels eines Szenario-Ansatzes (vgl. Kap. 3.2.3.1.3) ermittelt. Ziel der Szenario-Technik ist das frühzeitige Erkennen von Risiken für Produkte und Technologien, um dementsprechend Entscheidungen ableiten zu können. Solche Informationen sind für eine Ressourceneffizienzbewertung von Belang, da die langfristige Verfügbarkeit der benötigten Ressourcen sichergestellt sein sollte.¹²⁶

Relevant ist bei der Ressourceneffizienzbewertung grundsätzlich immer die Nutzungsphase¹²⁷ des Produktes (primäre **Bilanzierungsgrenze**). Fallweise können aber zusätzlich die vorgelagerten und nachgelagerten Lebenszyklusphasen (sekundäre Bilanzierungsgrenzen) von Belang sein (vgl. Kap. 5.4.2).

Dazu wird eine weitere Systematisierung nach der **Art eines Lösungsprinzips** nötig (vgl. Tab. 15): Ein Lösungsprinzip kann hier vereinfacht entweder ein *Material* (z. B. Stahl, Oberflächenbeschichtung, Aerogel) oder eine *Technologie* (z. B. Infrarottrocknung, Reinigen mit CO₂) sein. Darüber hinaus können verschiedene Fälle unterschieden werden: Zum einen kann die Zusammensetzung bzw. der Aufbau des Lösungsprinzips eher komplex oder eher einfach sein. Zum Anderen können die vor- oder nachgelagerten Phasen von besonderer Relevanz sein.

Folgende **beispielhafte Zusammenhänge** verdeutlichen dies:

- Bei einem Vergleich des Ressourcenverbrauchs zwischen zwei unterschiedlichen Dämmmaterialien mit überschaubarer stofflicher Zusammensetzung ist etwa die Berücksichtigung des Aufwands für die Nutzungsphase ausreichend (vgl. Bsp. in Tab. 16). Bei komplexen Materialverbänden ist neben der Nutzungsphase auch die nachgelagerte Lebenszyklusphase (z. B. Recycling) relevant. Die vorgelagerten Phasen sind hier eher von untergeordneter Relevanz, da entsprechende Daten häufig nur aufwändig zu erheben sind und dem Anwender keine Einsparpotenziale eröffnen. Al-

¹²⁶ Dies gilt insbesondere in den Fällen, in denen im Lebenszyklus ein hoher Ressourcenverbrauch und hohe Kosten zu erwarten sind. Grundsätzlich können Kosten auch beispielsweise mit turbulenten Veränderungen der Rohstoffpreise oder mit dem in bestimmten Bereichen zunehmendem Bedarf zusammenhängen (vgl. Kap. 3.1.2.1). Eine zukunftsorientierte Vorausschau unter Einbeziehung entsprechender Daten ist notwendig, weil mit fortschreitender Zeit der Handlungsspielraum immer enger wird und der Aufwand für etwaige Maßnahmen steigt.

¹²⁷ Diese wird durch die Annahme gerechtfertigt, dass die betrachteten Produkte den größten Ressourcenverbrauch meist in der Nutzungsphase haben (vgl. Kap. 3.3.2.2).

lerdings kann diese Betrachtung für den Hersteller selbst wesentlich sein, wenn beispielsweise seltene Materialien eingesetzt werden, so dass die Abschätzung des Ressourcenbedarfs in Form möglicher Risiken sinnvoll erscheint.

- Bei Technologien hängt die Relevanz der Lebenszyklusphase von dem Aufbau der Technologie in der vorgesehenen Anwendung ab. Ist von einem komplexen Aufbau der Technologie auszugehen, werden alle Lebenszyklusphasen mittels Bewertung des Ressourcenverbrauchs und -bedarfs berücksichtigt.

Tab. 15: Relevanz der sekundären Bilanzierungsgrenzen in der Ressourceneffizienzbewertung eines Lösungsprinzips

Art des Lösungsprinzips		Relevante sekundäre Bilanzierungsgrenzen			Beispiel
		Vorge-lagerte Phasen	Nutzung	Nachgelagerte Phasen	
Materi-al	komplexe bzw. mehrkomponentige stoffliche Zusammensetzung bzw. komplizierter Aufbau	● (RB)	● (RV)	● (RV, RB)	komplexe Oberflächenbeschichtung
	hohe Relevanz der vorgelagerten Phasen aufgrund des Vorliegens herstellungsintensiver Materialien bzw. Prozesse	● (RV, RB)	● (RV)	○	Aluminium, hochfester Stahl
	hohe Relevanz der nachgelagerten Phase aufgrund des Vorliegens entsorgungsintensiver Materialien bzw. Prozesse	○	● (RV)	● (RV, RB)	Verbundmaterial
Tech-nologie	komplexe bzw. mehrkomponentige stoffliche Zusammensetzung bzw. komplizierter Aufbau	● (RV, RB)	● (RV, RB)	● (RV, RB)	Trocknung mit überhitztem Wasserdampf
	hohe Relevanz der vorgelagerten Phasen aufgrund des Vorliegens herstellungsintensiver Materialien bzw. Prozesse	● (RV, RB)	● (RV, RB)	○	Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT)
	hohe Relevanz der nachgelagerten Phase aufgrund des Vorliegens entsorgungsintensiver Materialien bzw. Prozesse	○	● (RV, RB)	● (RV, RB)	Technologie mit teuren oder toxischen Betriebsstoffen

Legende: Bedingung gegeben X, relevant ●, teilweise relevant ◐, größtenteils nicht relevant ○, RV: relevant bei der Bewertung des Ressourcenverbrauchs, RB: relevant bei der Abschätzung des Ressourcenbedarfs

Mit dieser fallweisen Unterscheidung kann den Anforderungen aus dem Lebenszyklusgedanken insgesamt Genüge getan werden.¹²⁸

Ermittlung des Ressourcenverbrauchs der Lösungsprinzipien

Die Bewertung eines Lösungsprinzips erfolgt in drei Stufen:¹²⁹

¹²⁸ Dies wird speziell mittels der Ressourcenbedarfsbewertung geleistet, da so mögliche Risiken in vor- oder nachgelagerten Lebenszyklusphasen berücksichtigt werden können.

¹²⁹ Sie orientiert sich damit an dem Standardvorgehen bei MIPS nach RITTHOFF et al. (Ritthoff et al. 2002 und damit prinzipiell auch an der Ökobilanz nach EN ISO 14040 (vgl. Kap. 3.2.3.2.2).

1) Lebenszyklusphasenbeschreibung: Zur strukturierten Betrachtung eines Lösungsprinzips werden dessen Lebenszyklusphasen aufgeschlüsselt und als Prozesskette **abgebildet** (Abb. 25). Auf diese Weise erhält man einen Überblick über die zu berücksichtigenden Stufen von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung bis zur Anwendung (Nutzungsphase) und späteren Entsorgung mit den relevanten einzelnen Prozessschritten.

Mittels Input-Output-Bilanzen werden in tabellarischer Form alle die in einen Prozessschritt ein- bzw. austretenden Ressourcenströme (einzelne Materialien, Stoffe und Energien) einander gegenüber gestellt. Zu dem Input gehören dabei neben Vorprodukten und Komponenten auch Betriebs- und Hilfsstoffe sowie Energie. Zu dem Output gehören dagegen neben dem Produkt auch Abfälle und Emissionen (z. B. Abluft oder Abwasser). Diese Darstellung dient in erster Linie der Visualisierung von Zusammenhängen.

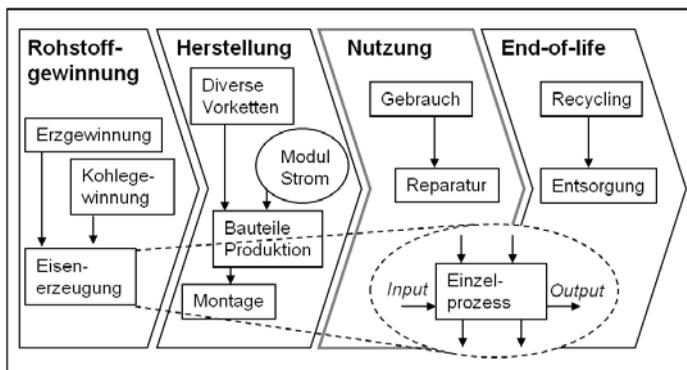


Abb. 25: Darstellung zur Beschreibung der Lebenszyklusphasen mit beispielhaften relevanten Prozessschritten eines Lösungsprinzips

2) Datenerhebung: In der zweiten Stufe werden für die relevanten Lebenszyklusphasen einzelner Lösungsprinzipien die notwendigen Daten im Sinne einer **Sachbilanz**¹³⁰ erhoben. Die notwendige Detaillierung der Darstellung ist abhängig von der Verfügbarkeit von Daten. Sind MIT-Werte zu einem Material oder einer Dienstleistung in der Literatur bereits dokumentiert, so müssen dessen Vorketten nicht notwendigerweise bilanziert werden – dies gilt z. B. für den Transportaufwand für eine Tonne Material per Lastkraftwagen (kg/tkm) (Wuppertal Institut 2003).

Die Daten werden mittels strukturierter **Erhebungsbögen** (siehe Tab. 43 im Anhang, Kap. 10.4) erhoben. Einzelne In- und Outputs werden dort unterschiedlichen Erhebungskategorien (z. B. natürliche Inputs wie abiotische Rohstoffe und vorbehandelte bearbeitete Inputs wie Vorprodukte) zugeordnet. Beim Ausfüllen der Bögen ist auf eine möglichst realistische und einheitliche Datenerhebung für alle Lösungsprinzipien und Referenzlösungsprinzipien einer Funktion (Serviceeinheit) zu achten, um zu vermeiden, dass einzelne Lösungsprinzipien im Vergleich zu Alternativen aufgrund mangelnder Datenqualität¹³¹ besonders schlecht oder gut bewertet werden (vgl. Kap. 3.2.3.2.2).

¹³⁰ Die Erstellung der Sachbilanz ist ein iterativer Prozess, bei dem Daten des Systems zu den relevanten Inputflüssen gesammelt werden. Diese Daten dienen dann als Grundlage für die sich anschließende Bewertung und müssen für jeden Prozess innerhalb der Systemgrenzen erhoben werden (DIN 1997).

¹³¹ Die häufig nicht zu vermeidenden Datenlücken müssen über „qualifizierte Schätzungen“ gefüllt werden. Hier können vergleichbare Erfahrungen und theoretische Berechnung – etwa bei verfahrenstechnischen Prozessen – weiterhelfen. Grundsätzlich ist zwischen allgemeinen und spezifischen Daten zu unterscheiden. Allge-

3) MIPS-Berechnung: In dieser Stufe wird der **Ressourcen-Input** des Lösungsprinzips im Kontext der Anwendung berechnet. Mittels der im vorherigen Schritt ermittelten Daten werden nun die relevanten Lebenszyklusphasen (vgl. Tab. 16) stufenweise durchgerechnet und die jeweiligen Ressourcen-Inputs bestimmt (vgl. Formel 2 in Kap. 3.2.3.2.2). Dabei werden sämtliche Daten eines Ressourcen-Inputs (z. B. elektrischer Strom) grundsätzlich auf Massen als Erhebungskategorie *abiotisches Material* bezogen.¹³² Generell brauchen der Einfachheit halber nur jene Ressourcen bzw. Untersuchungsgegenstände (z. B. Komponenten) in die Berechnung aufgenommen zu werden, bei denen sich das Lösungsprinzip vom entsprechenden Referenzlösungsprinzip unterscheidet (vgl. Beispiel in Tab. 16).

Aufsummiert über sämtliche relevanten Ressourcen ergibt sich für ein betrachtetes Lösungsprinzip ein **spezifischer MIPS-Wert**, der auf die im Produkt zu erfüllende Funktion zu normieren ist. Dessen Einheit richtet sich nach dem im letzten Schritt festgelegten Leistungswert, z. B. Kilowatt [kW] oder Megajoule [MJ]. Tab. 16 zeigt ein beispielhaftes Ergebnis der Ressourcenverbrauchsbewertung für ein Lösungsprinzip und dessen Referenzlösungsprinzip. Hierbei erreicht das fiktive Lösungsprinzip „Dämmplatte“, welches aus den beiden Ressourcen Polystyrol und Primärstahl besteht, einen MIPS_L-Wert von 0,15 kg pro vermiedene Wärmeableitung von 1 MJ (vgl. Formel 2). Das Referenzlösungsprinzip, welches eine reine Stahlverkleidung vorsieht, erreicht hingegen einen MIPS_{LR}-Wert von 0,20 kg / MJ – führt also zu einem höheren Ressourcenverbrauch in der Nutzungsphase.

Tab. 16: Beispielhaftes Ergebnis der Ressourcenverbrauchsbewertung für das Lösungsprinzip „Dämmplatte“ und das Referenzlösungsprinzip „Stahlverkleidung“ des Produktes „Autowaschanlage“ und der Funktion „Wärmeableitung vermeiden“

Ressource bzw. Untersuchungsgegenstand	Lösungsprinzip „Dämmplatte“	Referenzlösungsprinzip „Stahlverkleidung“	Annahmen / Kommentare
Polystyrol	0,5 [kg]	-	Menge Polystyrol ist 2 kg, MIT abiotisches Material Polystyrol ist 2,5
Primärstahl	0,10 [kg]	0,20 [kg]	<ul style="list-style-type: none"> • Lösungsprinzip: Menge Primärstahl ist 1,4 kg, MIT abiotisches Material Primärstahl ist 6,97 • Referenzlösungsprinzip: Menge Primärstahl ist 2,9 kg, MIT abiotisches Material Primärstahl ist 6,97
MIPS-Wert	0,15 [kg/MJ]	0,20 [kg/MJ]	

Dies ist ein vergleichsweise einfaches Beispiel. Bei **komplexen technologischen Lösungsprinzipien** ist die Bestimmung der benötigten Ressourcen teilweise schwierig, da ggf. auch für eingesetzte Ressourcen keine MIT-Werte vorhanden sind und daher neu berechnet werden müssen (vgl. Herausforderung der Datenbeschaffung in Kap. 5.4.2).

meine Daten stellen Durchschnittswerte da und beziehen sich auf Produktklassen. Spezifische Daten gelten nur für den betrachteten Fall und spezielle Bedingungen. Auch der Geltungsbereich der Daten beispielsweise hinsichtlich regionalen oder zeitlichen Faktoren muss berücksichtigt werden (vgl. Ritthoff et al. 2002).

¹³² Aufgrund des Zuschnitts der Bewertung (vgl. Kap. 5.4.2) werden sämtliche benötigte Ressourceninputs als Materialaufwand (abiotisches Material) verstanden, um damit die Vielfalt möglicher Erhebungskategorien zu minimieren (vgl. Kap. 3.2.3.2.2). Zudem ist für eine betriebswirtschaftliche Betrachtung die Berücksichtigung des abiotischen Materialaufwands meist ausreichend. In Spezialfällen, z. B. wenn der Wasserverbrauch des gewählten Produktes explizit reduziert werden soll, können auch die anderen Erhebungskategorien, wie z. B. Wasser (vgl. Kap. 3.2.3.2.2) zusätzlich berücksichtigt werden.

Abschätzung des künftigen Ressourcenbedarfs der Lösungsprinzipien

In diesem Verfahrensschritt wird zur Bestimmung des zukünftigen Ressourcenbedarfs eines Lösungsprinzips die **Szenario-Technik** eingesetzt. Als Gestaltungsfeld im Verständnis der Szenario-Technik werden in dieser Betrachtung die relevanten Lebenszyklusphasen (vgl. Tab. 15) des Lösungsprinzips definiert. Als Szenariofeld im Sinne des Betrachtungsberichts – für den die Entwicklungsmöglichkeiten durch Szenarios beschrieben werden – wird hier der künftige Ressourcenbedarf definiert.

Weiterhin gilt es, die relevanten (die das Gestaltungsfeld beeinflussenden) Einflussfaktoren zu identifizieren und auszuwählen. In der Tab. 17 sind die mittels Einflussanalyse ausgewählten Einflussfaktoren¹³³ als eine Wissensbasis zusammengetragen. Ggf. muss diese Wissensbasis je nach Lösungsprinzip um weitere Einflussfaktoren erweitert werden. Für die einzelnen Faktoren sind zu dem geeignete Indikatoren wie bestimmte Statistiken zu identifizieren. Im Falle der *Ressourcenverfügbarkeit* sind zu dem die Lage, der Verlauf und die Erschließung von Vorkommen und Lagerstätten oder die benötigten Abbau- und Erschließungskosten zu berücksichtigen.¹³⁴ Tab. 17 zeigt weiterhin alternative Entwicklungsmöglichkeiten für die Einflussfaktoren als sogenannte Zukunftsprojektionen (Projektionen), die der Einfachheit halber in dieser Betrachtung festgelegt sind und sich auf den festen Zeithorizont von 10 Jahren beziehen.¹³⁵

Die Bewertung¹³⁶ eines Lösungsprinzips wird in drei Stufen (vgl. VDI 2000) vollzogen:

1) Szenario-Ressourcenauswahl: Zuerst gilt es die **relevanten Ressourcen** (z. B. Lithium) des zu betrachtenden Lösungsprinzips (z. B. Lithium-Ionen-Batterie) zu bestimmen. Eine Relevanz liegt vor, wenn mindestens einer dieser Impulse zutrifft:

- starke *Abhängigkeiten* von externen Entwicklungen (politisch, rechtlich, wirtschaftlich etc.), etwa aufgrund einer strategischen Bedeutung eingesetzter Ressourcen. Beispielsweise ist im Falle des Rohstoffs Lithium von einer starken Abhängigkeit an die Entwicklungen der Elektromobilität auszugehen (vgl. Angerer et al. 2009).
- hohe *Kosten* im Einkauf, z. B. aufgrund der Seltenheit bzw. unsicheren Verfügbarkeit bestimmter benötigter Ressourcen wie bei einigen Metallen (vgl. Kostenbewertung in Kap. 5.4.2.3)
- hoher *Ressourcenverbrauch* während der Nutzungsphase oder anderer Lebenszyklusphasen
- keine bekannten *Möglichkeiten des Recyclings* und Rückgewinnung wertvoller Ressourcen wie im Falle von bestimmten Multimaterialsystemen

Liegen hiernach keine Relevanzen vor, braucht der künftige Ressourcenbedarf des Lösungsprinzips nicht bestimmt zu werden.

2) Szenario-Bildung: Wurden relevante Ressourcen identifiziert, gilt es nun, mittels der definierten Projektionen entlang der Einflussfaktoren in Tab. 17 je eine handhabbare Anzahl schlüssiger und anwendbarer Szenarios (in der Regel zwei) herauszuarbeiten. Ein Szenario

¹³³ Diese ausgewählten Einflussfaktoren werden auch Schlüsselfaktoren genannt (Gausemeier et al. 2001).

¹³⁴ Für eine vollständigere Liste relevanter Indikatoren und zugehöriger Literatur siehe ROSENAU-TORNOW (Rosenau-Tornow et al. 2009).

¹³⁵ Die analytische und auch kreative Ermittlung möglicher Projektionen kann ähnlich wie bei der Bestimmung der Einflussfaktoren nicht exakt vorgegeben werden. Hierfür finden sich allerdings Hinweise in der Literatur.

¹³⁶ Bei GAUSEMEIER findet die Szenarioerstellung in den fünf Schritten (Szenario-Vorbereitung, Szenariofeld-Analyse, Szenario-Prognostik, Szenario-Bildung und Szenario-Transfer statt (Gausemeier et al. 2001). Aufgrund des eingegrenzten Betrachtungsfeldes scheint hier ein verkürztes Vorgehen mit reduzierten Teilschritten bzw. vordefinierten Parametern ausreichend (vgl. VDI 2000).

ist dabei eine **Kombination von Projektionen**, die von der inhaltlichen Ausrichtung gut zusammenpassen. Beispielsweise passt eine zunehmende Ressourcennachfrage gut zu einem zunehmenden Ressourcenpreis. Entscheidend ist dabei die Konsistenz, d. h. die Widerspruchsfreiheit der einzelnen Projektionen des Szenarios zueinander. Unterstützen kann dabei eine Konsistenzanalyse (Gausemeier et al. 2001). Tab. 17 zeigt eine beispielhafte Auswahl zweier möglicher Szenarios für die Ressource „Lithium“ des Lösungsprinzips „Lithium-Ionen-Batterie“ entlang der definierten relevanten Einflussfaktoren. Die Szenarios werden in Kurzbeschreibungen verbal dargestellt und dokumentiert.

Tab. 17: Einflussfaktoren mit möglichen Projektionen und Szenarios für das Lösungsprinzip „Lithium-Ionen-Batterie“ bezogen auf die Ressource „Lithium“

Einflussfaktoren	Projektionen		
Allgemeine			
Weltwirtschaftsentwicklung	abnehmend	konstant	zunehmend
Bedeutung von Umwelt-/Klimaschutz	abnehmend	konstant	zunehmend
Stabilität der internationalen Beziehungen	abnehmend	konstant	zunehmend
Lösungsprinzip-spezifische			
Anwendungsbreite des Lösungsprinzips	abnehmend	konstant	zunehmend
potenzielle Märkte für das Lösungsprinzip	abnehmend	konstant	zunehmend
Ressourcen-spezifische			
Ressourcenverfügbarkeit	abnehmend	konstant	zunehmend
Ressourcenabbautätigkeit	abnehmend	konstant	zunehmend
Abhängigkeit von anderen Ressourcenabbauaktivitäten ¹³⁷	abnehmend	konstant	zunehmend
Ressourcennachfrage	abnehmend	konstant	zunehmend
Ressourcenpreise	abnehmend	konstant	zunehmend
Ressourcen-Einsatzbreite (Anwendungsspektrum) ¹³⁸	abnehmend	konstant	zunehmend
Recyclingfähigkeit oder sonstige Möglichkeiten der erneuten Verwendung der Ressource nach der Nutzung	abnehmend	konstant	zunehmend

Legende: Beispielhafte Szenarios (Szenario „Profit“: ) (Szenario „Öko“: )

3) **Szenario-Transfer**: Hier werden nun in den erarbeiteten Szenarios die **Auswirkungen von Risiken** auf das Gestaltungsfeld und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten qualitativ abgeschätzt. Diese zu dem Ressourcenbedarf eines Lösungsprinzips möglichen Risiken müssen ggf. zusammen mit Experten und einschlägiger Literatur sowie Veröffentlichungen¹³⁹

¹³⁷ Seltene Metalle liegen oft in Kombination vor und werden daher zusammen abgebaut wie im Fall von Indium mit Zink. In diesem Fall muss die Abhängigkeit von der Zinknachfrage berücksichtigt werden.

¹³⁸ Einige spezielle Ressourcen sind für mehrere Technologien von essentieller Bedeutung. So konkurrieren schon heute zahlreiche Zukunftstechnologien wie die Photovoltaik um den Rohstoff Silber.

¹³⁹ Im Beispiel wurde das Rohstoffversorgungs-Risiko-Rating des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln genutzt (vgl. Tab. 41, Kap. 10.110.3.2 des Anhangs).

erarbeitet werden. Hieraus kann sich beispielsweise ergeben, dass eine benötigte Ressource in zehn Jahren wahrscheinlich nicht mehr verfügbar oder im Preis extrem gestiegen sein wird. Schließlich werden die Risiken durch eine einfache Gegenüberstellung dieser zwei Dimensionen bewertet:

- *Auswirkung* des Risikos für das Gestaltungsfeld: Darunter wird die Intensität der Einwirkung auf das Gestaltungsfeld verstanden.
- *Eintrittswahrscheinlichkeit* des Risikos: Darunter wird die Wahrscheinlichkeit verstanden, dass die Auswirkungen eintreten.

Mit diesen lässt sich ein Portfolio aufspannen. Die Abb. 26 zeigt beispielhaft das Risiko (Risiko A), dass Lithium nach dem Szenario „Profit“ aus Tab. 17 zukünftig nur noch begrenzt verfügbar sein wird.

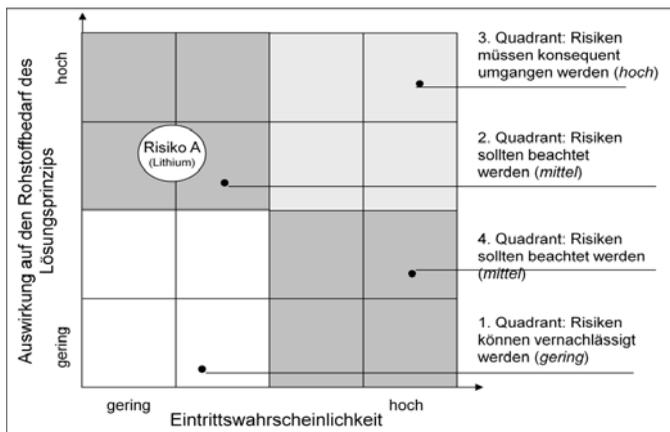


Abb. 26: Portfolio zur Bewertung von Risiken im Zusammenhang mit dem Ressourcenbedarf eines Lösungsprinzips am Beispiel „Lithium-Ionen-Batterie“

Mittels dieser Portfoliodarstellung ist die Ableitung einer begründbaren qualitativen Aussage (hoch, mittel oder gering) zu der Relevanz möglicher Risiken im Zusammenhang mit dem spezifischen Ressourcenbedarf eines Lösungsprinzips leistbar.

Zusammenfassung der Bewertung der Ressourceneffizienz eines Lösungsprinzips

Für die Bewertung der Ressourceneffizienz eines Lösungsprinzips wird die repräsentative Kennzahl *Ressourceneffizienzwert* als MIPS-Wert berechnet. Mittels dieser Berechnungen können auch bei Bedarf die Einsparpotenziale etwa bzgl. der Energie sowie weitere Kennzahlen (z. B. CO₂-Footprint, vgl. Kap. 5.1.2.2) ermittelt werden. Weiterhin wird die Bestimmung von Risiken im Zusammenhang mit dem Ressourcenbedarf eines Lösungsprinzips geleistet.

5.4.2.3 Schritt IV.c: Kostenbewertung

In diesem Schritt werden die identifizierten Lösungsprinzipien (Investitionen) hinsichtlich zukünftig aufzubringender Lebenszykluskosten mittels einer **Lebenszykluskostenrechnung** bewertet (vgl. Kap. 3.2.3.2.1).

Der hier betrachtete Bilanzraum ist – wie in der Tab. 40 in Kap. 10.3.2 des Anhangs gezeigt – auf die Nutzungsphase fokussiert, wobei auch ggf. die sekundären Bilanzierungs-

grenzen (vorgelagerte und nachgelagerte Phasen) berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn eine der folgende Voraussetzungen gegeben ist:

- hoher MIPS-Wert bzgl. des sekundären Bilanzraums in der Ressourceneffizienzbewertung
- Identifikation kostenbezogener Risiken in der Ressourceneffizienzbewertung, die sich im sekundären Bilanzraum auswirken

Aufgrund der teilweise möglichen Unsicherheit¹⁴⁰ über den realistischen Betrag der anfallenden Kosten gilt es, für die Berechnungen stets vergleichbare Annahmen zwischen den Alternativen zu treffen, z. B. zum Wartungsaufwand oder den zugrunde gelegten Energiepreisen.

Darüber hinaus ist die mögliche Leistung des Lösungsprinzips (vgl. Kap. 5.4.2.1) zu berücksichtigen. Können durch das Lösungsprinzip etwa zusätzliche Funktionalitäten abgedeckt werden, so ist dessen Leistung höher zu bewerten und daher auch ggf. attraktiver für den Anwender. Dieses höhere ökonomische Nutzenpotenzial z. B. hinsichtlich des Komforts oder der Zuverlässigkeit, ist zu quantifizieren und in die Kostenbetrachtung zu integrieren.¹⁴¹

Berechnung der Lebenszykluskosten der Lösungsprinzipien

Für den Vergleich zwischen verschiedenen Lösungsprinzipien wird die **Kapitalwertmethode** angewendet. Für die Berechnung des Kapitalwertes als Kennzahl (vgl. Kap. 5.4.2) ist folgendes vereinfachtes Vorgehen durchzuführen (vgl. Kap. 3.2.3.2.1):

1) Investitionskosten: Zuerst sind die notwendigen Kosten zur Integration des Lösungsprinzips in das Produkt (inkl. Entwicklungskosten) zu bestimmen.

2) Kosten der Lebenszyklusphasen: Die Kosten der Lebenszyklusphasen ergeben sich aus der Summe der auf den Beginn der Anwendung des Lösungsprinzips im Produkt für jedes Jahr diskontierten Ein- bzw. Auszahlungsüberschüsse (Rückflüsse) bis zum abgeschätzten Ende der Anwendung und der benötigten Entsorgung. Hier dient die bereits erstellte Lebenszyklusphasenbeschreibung (Bilanz) aus dem Schritt IV.b (Kap. 5.4.2.2) als Grundlage.

3) Kapitalwert: Als Kennzahl ist nun der Kapitalwert für das Lösungsprinzip nach Formel 6 zu berechnen. Der **Kapitalwert** des zu betrachtenden Lösungsprinzips ergibt sich aus der Summe der Kosten einer Anwendung, die durch die Investition eines Lösungsprinzips verursacht werden. Dieser ist somit auf den jeweiligen Anwendungskontext bezogen, welcher durch die zu erfüllende Funktion vorgegeben ist. Er berechnet sich nach:

$$K_j = -I_j + \sum_{t=0}^n (E(t) - A(t))_j \cdot (1+i)^{-t}$$

(mit K: Kapitalwert, I: Investition, t: Periode, E(t): die kumulierten Einzahlungen in der Periode t, A(t): die kumulierten Auszahlungen in der Periode t, i: kalkulatorischer Zinssatzbetrag zum Zeitpunkt 0, n: voraussichtliche Nutzungsdauer, i: der Kalkulationszinsfuß, j: Laufindize)

Formel 6: Berechnung des Kapitalwertes

Im Allgemeinen können aus einem einzigen Kapitalwert häufig keine weitreichenden Aussagen abgeleitet werden.¹⁴² In dieser Betrachtung wird jedoch lediglich ein Vergleich zwischen

¹⁴⁰ Unsicherheiten können sich etwa aufgrund von Verrechnungsproblemen (z. B. das Umgeschlagen der Vorlauf- und Nachlaufkosten auf die einzelnen Lösungsprinzipien) oder einer erschwerten Prognostizierbarkeit ergeben.

¹⁴¹ Der höhere Nutzen kann sich in geringerem Schadensersatzrisiko oder gesteigerter Produktivität ausdrücken.

¹⁴² Dies ist darin begründet, dass der Wert allein nicht die Vorteile bzw. Nachteile der lebenszyklusweit verteilten Akteure (z. B. Hersteller und Anwender) widerspiegeln kann. Im typischen Anwendungskontext der Kapitalwertmethode bedeutet ein positiver Kapitalwert, dass die Investition unter finanziellen Gesichtspunkten von Vorteil ist. Nimmt der Kapitalwert einen negativen Wert an, so ist von der Investition abzuraten.

den alternativen Lösungsprinzipien bzw. mit dem Referenzlösungsprinzip benötigt. In einem solchen ist jenes Lösungsprinzip vorzuziehen, welches den höheren Kapitalwert aufweist.

Zusammenfassung der Bewertung der Kosten eines Lösungsprinzips

Zur Bewertung der Kosten eines Lösungsprinzips gilt es, die Investitionskosten und die Kosten der Lebenszyklusphasen abzuschätzen, um daraus den Kapitalwert als dritte repräsentative Kennzahl *Kosten* (vgl. Kap. 5.4.2) zu bestimmen.

5.4.3 Ergebnisse der Verfahrensphase

Ergebnis der Verfahrensphase IV sind die nach den drei Bewertungsdimensionen Funktionalität, Ressourceneffizienz und Kosten bewerteten Lösungsprinzipien. Die Bewertungsergebnisse fließen in die Nutzenbetrachtung in Schritt V.a ein.

5.5 Phase V: Planung der Maßnahmen

5.5.1 Ziel der Phase V

Ziel dieser letzten Phase des Verfahrens ist es, die identifizierten Lösungsprinzipien nach deren ganzheitlichen Nutzen zu vergleichen sowie die erfolgversprechendsten auszuwählen, um Entscheidungen vorbereiten zu können (vgl. Kap. 3.2.1.2 und 3.2.2). Die Ergebnisse geben die Eingangsgrößen für eine spätere fallspezifische Umsetzungsphase.

5.5.2 Methodisches Vorgehen

Die Vorgehensweise bis zur Planung von Maßnahmen gliedert sich in zwei Schritte. Zuerst werden geeignete Indikatoren identifiziert und als Nutzenfaktoren formuliert, die dann eine verdichtete Nutzenbetrachtung in einem Netzdiagramm ermöglichen (Schritt V.a). Im nächsten Schritt V.b erfolgen auf Grundlage einer Portfoliobetrachtung die finale Auswahl der Lösungsprinzipien und die Ableitung von Maßnahmen (vgl. Abb. 27).

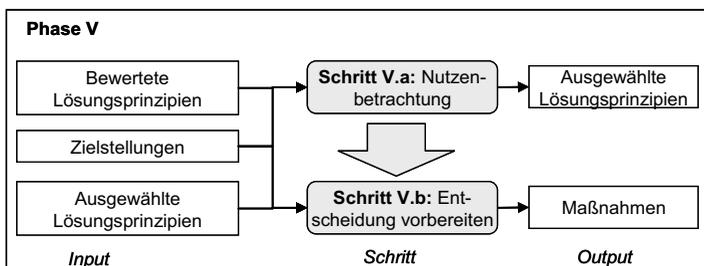


Abb. 27: Schritte von Phase V (Planung der Maßnahmen)

5.5.2.1 Schritt V.a: Nutzenbetrachtung

Entwicklung der Nutzenfaktoren

Der Nutzen der identifizierten Lösungsprinzipien leitet sich aus der Übereinstimmung mit der zugehörigen TReF und der Tauglichkeit zur Umsetzung der PReF ab. Die **Nutzenbeschreibung** wird mittels Nutzenfaktoren geleistet, die aus geeigneten Indikatoren der vorherigen Verfahrensschritte abgeleitet wurden (Tab. 18). Letztere beziehen sich auf die

- im Rahmen der Bewertung (Kap. 5.4) ermittelten *repräsentativen Kennzahlen* und
- berechneten *Kenngößen* sowie zum anderen auf die
- hier zu betrachtenden *Zielübereinstimmungen* mit den Zielen aus Kap. 5.1.2.2.

Tab. 18: Überblick der Nutzenfaktoren eines Lösungsprinzips in Phase V

Nutzenbeschreibung				Herleitung			
Nutzenfaktor	Fragestellung	Bezug	Spannbreite [Einheit]	Indikator	Verfahrensschritt	Bezugsgröße	Spannbreite [Einheit]
Funktionalität							
1. Leistungswert	Welche technische Leistung hat das Lösungsprinzip?	Abweichung vom Referenzlösungsprinzip	-∞ bis +∞ [%]	Leistungswert	Schritt IV.a	Repräsentative Kennzahl	0 bis ∞ [z. B. kW]
2. Technische Erfüllung der Funktion	Welche Funktionalität hat das Lösungsprinzip?	absolut	0; 11,1 33,3, 66,7 oder 100 [%]	Funktionalitätsgrad	Schritt IV.a	Kenngroße	0, 1, 3 oder 9
3. Technologiebezogene Zielkonformität	Stimmt das Lösungsprinzip prinzipiell mit den Zielstellungen überein?	absolut	0, 50 oder 100 [%]	Technische Lösungszielstellungen (Z _{T3})	Schritt II.a	Zielübereinstimmung: 0 = nein 1 = unklar 3 = ja / denkbar	0, 1 oder 3
Ressourceneffizienz							
4. Ressourceneffizienzwert	Wie ist der Ressourcenverbrauch des Lösungsprinzips einzuordnen?	Abweichung vom Referenzlösungsprinzip	-∞ bis +∞ [%]	MIPS-Wert	Schritt IV.b	Repräsentative Kennzahl (absolut bzw. Differenz zum Referenzlösungsprinzip)	0 bis ∞ [z. B. kg]
5. Sicherung des Rohstoffbedarfs	Wie ist der Rohstoffbedarf des Lösungsprinzips einzuordnen?	absolut	0; 50 oder 100 [%]	Rohstoffversorgungsrisiko	Schritt IV.b	Kenngroße: 3 = Keine Risiken oder Risiken im 1. Quadranten (gering); 1 = Risiken im 2. oder 4. Quadranten (mittel); 0 = Mindestens ein Risiko im 3. Quadranten (hoch)	0; 1 oder 3
6. Ressourcennutzungsbezogene Zielkonformität	Stimmt das Lösungsprinzip prinzipiell mit den Zielstellungen überein?	absolut	0; 50 oder 100 [%]	Ressourcennutzungsbezogene Lösungszielstellungen (Z _{R3})	Schritt I.b	Zielübereinstimmung: 0 = nein 1 = unklar 3 = ja / denkbar	0, 1 oder 3

Nutzenbeschreibung				Herleitung			
Nutzenfaktor	Fragestellung	Bezug	Spannbreite [Einheit]	Indikator	Verfahrensschritt	Bezugsgröße	Spannbreite [Einheit]
Ökonomie							
7. Kostenwert	Welche Lebenszykluskosten hat das Lösungsprinzip?	Abweichung vom Referenzlösungsprinzip	$-\infty$ bis $+\infty$ [%]	Kapitalwert	Schritt IV.b	Repräsentative Kennzahl	$-\infty$ bis $+\infty$ [z. .B. €]
8. Investitionskosten	Wie hoch sind die Investitionskosten des Lösungsprinzips?	absolut	0, 50 oder 100 [%]	Investitionskosten	Schritt IV.b	Kenngroße	0 bis ∞
9. Ökonomiebezogene Zielkonformität	Stimmt das Lösungsprinzip prinzipiell mit den Zielstellungen überein?	absolut	0, 50 oder 100 [%]	Ökonomische Lösungszielstellungen (Z_{03})	Schritt II.a	Zielübereinstimmung: 0 = nein 1 = unklar 3 = ja/denkbar	0; 1 oder 3

Vergleichende Darstellung des Nutzens der Lösungsprinzipien

Zur Ermittlung der relevantesten Lösungsprinzipien aus den möglichen Alternativen erfolgt nun eine vergleichende Darstellung des Nutzens einzelner Lösungsprinzipien in einem Netzdiagramm.

Für die Erstellung eines derartigen Diagramms gilt es, die Werte zu den neun Nutzenfaktoren aus Tab. 18 von dem Mittelpunkt ausgehend auf den Sektoren des Kreises im Sinne der Abb. 28 abzutragen. Die **Bewertung** wird entweder durch den prozentualen Abstand zum Referenzlösungsprinzip (im Fall der *repräsentativen Kennzahlen*) oder bei den *Kenngroßen* und *Zielübereinstimmungen* als Absolutwert symbolisiert. Außen liegende Punkte beschreiben dabei den Idealzustand.

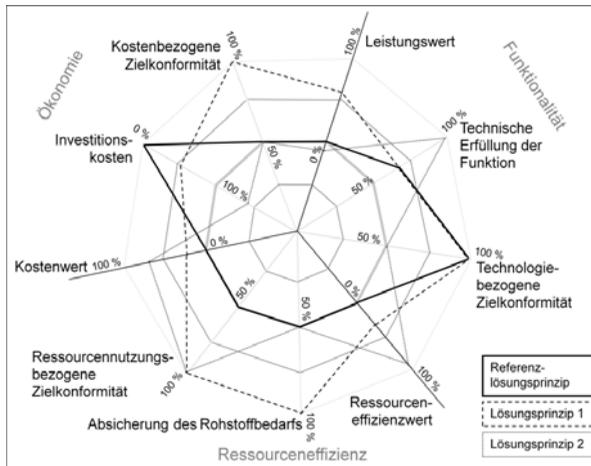


Abb. 28: Beispielhafte Darstellung des ganzheitlichen Nutzens von zwei alternativen Lösungsprinzipien und dem Referenzlösungsprinzip für eine Funktion

Mit dieser Darstellung liegt eine aggregierte Auswertung der drei linear unabhängigen Dimensionen Funktionalität, Ressourceneffizienz und Ökonomie vor. Diese aggregierten Informationen zum ganzheitlichen Nutzen eines Lösungsprinzips können als Datengrundlage für die **Kommunikation** zur Performanz des Produktes (etwa gegenüber dem Kunden) genutzt werden. Hieran lässt sich die im Zusammenhang der umweltorientierten Produktausrichtung häufig diskutierte Problematik der Zielkonflikte zwischen Ökonomie und Ökologie veranschaulichen und in einer transparenten Form in den weiteren Entscheidungsprozess einbringen (vgl. Kap. 3.2.2 und 3.3.2.2).

5.5.2.2 Schritt V.b: Entscheidung vorbereiten

Portfoliobewertung

Nun gilt es, mittels einer Portfoliodarstellung¹⁴³ eine Entscheidung herbeizuführen. **Voraussetzung für die Auswahl der Lösungsprinzipien** ist die Identifikation und Festlegung von Beurteilungskategorien mit den dazu gehörigen Kriterien, auf deren Grundlage eine Bewertung vorgenommen werden kann. Im vorliegenden Verfahren wird dazu vorgeschlagen, die Kriterien direkt aus der Zielstellung (siehe Schritt I.b) abzuleiten. Die einzelnen Ziele stellen dabei Primärkriterien dar, die grundsätzlich erfüllt sein sollten.

Vor diesem Hintergrund liegt die Herausforderung darin, bei der Bewertung alle relevanten Aspekte zu berücksichtigen, insbesondere dann, wenn die entwickelten Ziele nur Teilbereiche abdecken und beispielsweise Fragen der Umsetzbarkeit offen bleiben. Zur Strukturierung werden die **Kategorien Umsetzungsaufwand** für den Hersteller und **Anwendungsattraktivität** für den Anwender vorgegeben. In ihrer Eigenschaft stellen die Dimensionen Multifaktoren dar, d. h., ihnen können mehrere Kriterien zugeordnet werden. Nachfolgend sind die Bewertungskategorien kurz erläutert:

¹⁴³ Der Portfolio-Ansatz wird gewählt, da Portfolien weit verbreitet und in der Praxis erprobte Bewertungsinstrumente darstellen. Darüber hinaus bieten sie eine gute Vergleichsmöglichkeit der einzelnen Alternativen, auf deren Grundlage strategische Entscheidungen getroffen werden können (vgl. Pfeiffer et al. 1991, Gassmann, Kobe 2006).

- **Umsetzungsaufwand:** Die Kategorie beinhaltet Kriterien wie die finanzielle und technische Umsetzbarkeit im Hinblick auf bestimmte Randbedingungen, die Dauer der Umsetzung, das Risiko oder das Potenzial zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit. Als Kennzahl kann hier auch der Investitionsaufwand (vgl. Kap. 5.4.2.3) hinzugezogen werden.
- **Anwendungsattraktivität:** Die Kategorie beinhaltet Kriterien wie die Kundenattraktivität, wobei etwa nach Begeisterungsanforderung, Leistungsanforderung oder Basisanforderung unterschieden werden kann (vgl. Kano et al. 1984). Weiterhin sind die erzielbaren Kosteneinsparungen (vgl. Kap. 5.4.2.3) oder auch die Realisierung einer höheren Qualität durch die Anwendung des Lösungsprinzips relevant (vgl. Kap. 3.1.3.2). Zudem fließt hier die erzielbare Einsparung von Ressourcen bzw. die Minderung der Umweltbelastung mit ein.

Neben der Zuordnung der Kriterien zu den einzelnen Achsen gilt es zudem, die Achsen zu skalieren und die **Kriterien zu gewichten**. Die Kriterien mit der größten Bedeutung bekommen den größten Gewichtungsfaktor zugeteilt. Tab. 19 stellt dazu ein Beispiel anhand des Kriteriums *Notwendige Zeit zur Umsetzung* mit einer Ordinalskala von 1 bis 4 dar.

Tab. 19: Beispielhafte Kriterienbeschreibung

Ausprägung Kriterium	Sehr hoch (1)	Hoch (2)	Gering (3)	Sehr gering (4)
Notwendige Zeit zur Umsetzung	Die Umsetzung des Lösungsprinzips ist sehr zeitintensiv (> 24 Monate)	Die Umsetzung des Lösungsprinzips ist zeitintensiv (12-22 Monate)	Das Lösungsprinzip ist relativ schnell umzusetzen (3-12 Monate)	Das Lösungsprinzip ist innerhalb kürzester Zeit umsetzbar (< 3 Monate)

Abschließend werden die beiden **Dimensionen** *Umsetzungsaufwand* und *Anwendungsattraktivität* als Messgröße für die Ordinate bzw. die Abszisse in einem Portfolio installiert (siehe Abb. 29). Die Achsen werden jeweils als Ordinalskala ausgeführt.

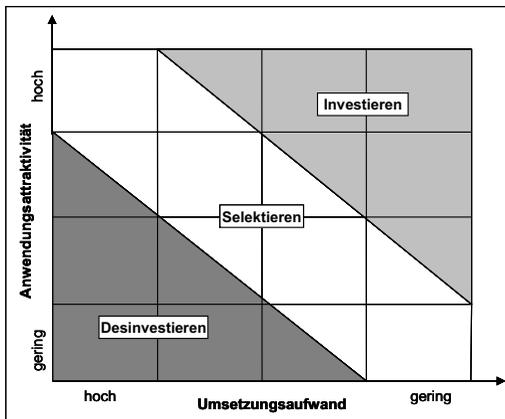


Abb. 29: Portfolio mit den Dimensionen „Umsetzungsaufwand“ und „Anwendungsattraktivität“ zur Auswahl der Lösungsprinzipien

Im relativen Portfoliovergleich schneidet im Regelfall das Lösungsprinzip am besten ab, welches sich stärker in Richtung der oberen rechten Ecke positionieren kann. Dies entspricht einer hohen Attraktivität für Hersteller und Anwender. Stehen Lösungsprinzipien in Konkurrenz, muss im Einzelfall entschieden werden, welche Lösung umgesetzt werden soll.

Maßnahmen

Die unternehmerische Umsetzung von technologischen Erfolgspotenzialen bedarf einer zielgerichteten Steuerung, die sich an evtl. vorhandenen Strategien wie Differenzierung, Fokussierung oder Technologieführerschaft orientieren muss (vgl. Tschirky, Koruna 1998, Bullinger 1994). Die sich hieraus ergebenden Anforderungen gilt es nun bei der Entwicklung konkreter Maßnahmen und Aktivitäten zur Umsetzung der ausgewählten neuen technologischen Lösungsprinzipien im Produkt zu berücksichtigen. Abhängig von den bestehenden Erfahrungen und dem spezifischen Wissen zu den ausgewählten Lösungsprinzipien für den Anwendungskontext und der Technologiereife sind unterschiedliche **Herangehensweisen** geboten. Hierbei kann es sich um Maßnahmen des operativen Technologiemanagements oder auch längerfristige strategische Aktivitäten handeln (Bullinger 1995). Hierzu gehören:

- die eigene Weiterentwicklung eines Lösungsprinzips
- die Adaption eines extern weiter entwickelten Lösungsprinzips
- die Akquisition von externem Wissen zur gemeinsamen Weiterentwicklung eines Lösungsprinzips

Dabei kann gerade die **Übertragung** von Ergebnissen aus dem Labormaßstab in die industrielle Praxis meist nur von einem Verbund aus mehreren Partnern geleistet werden. Allein für die Integration eines neuen Materials in ein bestehendes System kann ein hohes Maß an Kooperation und eine Beteiligung von Forschungs- und Entwicklungspartnern sowie Zulieferern erforderlich sein (vgl. Spath, Warschat 2008). Denn häufig gilt: Um weiterentwickelte Produkte, die neue technologische Lösungsprinzipien enthalten, prozesssicher und wirtschaftlich herzustellen, ist es notwendig, die bisherigen Grenzen der Produktionstechnologien zu überwinden. Dies gilt insbesondere für Investitionsgüter des Maschinen- und Anlagenbaus. Hier kommt hinzu, dass diese häufig im komplexen Zusammenspiel mit anderen Maschinen beim Anwender eingesetzt werden, über welche dem Hersteller häufig nicht genügend Informationen vorliegen.

Die **Umsetzung** der Lösungsprinzipien kann prinzipiell komplementär, substituierend oder neuartig (vgl. Kap. 3.2.1.4) zu den bisher angewendeten Technologien im Produkt stattfinden. Mit dem Ausmaß der erforderlichen Eingriffstiefe steigt auch die Notwendigkeit, das Gesamtsystem zu berücksichtigen und nach probaten Systemlösungen zu suchen. Die Resultate hängen stark von der strategischen Orientierung und den existierenden verfügbaren Kompetenzen im Unternehmen ab.

5.5.3 Ergebnisse der Verfahrensphase

Im Anschluss an die Auswahl der Lösungsprinzipien und der Maßnahmen zur Umsetzung ist die Grundlage für deren Pilotierung und Implementierung im Unternehmen gelegt.

5.6 Zusammenfassung des Verfahrens

Mit dem in diesem Kap. ausgearbeiteten Verfahren liegt ein **neues Verfahren** zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung für Hersteller vor. Der Verfahrensansatz beruht auf der gezielten Kombination von methodischen Ansätzen wie der Umweltwirkungsbewertung (z. B. Schwachstellenanalyse) und der Problemlösung (TRIZ) sowie einem Technologiepotenzialmodell als systematischem Zugang zum Konzept der Ressourceneffizienz. Das Verfahren bietet damit eine methodische Unterstützung bei der Identifikation und Bewertung von ressourceneffizienzsteigernden Lösungsprinzipien zur Nutzenoptimierung eines Produktes für zuvor identifizierte Schwachstellen in der Nutzungsphase an.

In der Phase I werden wesentliche **Rahmenbedingungen und Aufgaben** des Verfahrens festgelegt. Hierzu gehören die Erfassung des zu betrachtenden Produktes im Sinne eines komplexen Investitionsgutes des Maschinen- und Anlagenbaus und die Bestimmung der ganzheitlichen Zielstellungen. Die Phase II beginnt mit der Schwachstellenanalyse. Dafür

müssen für das Produkt nach der Dekomposition vorhandene Informationen zu **ressourcen-effizienzbezogenen Problemstellungen** in der Nutzungsphase zusammengetragen, bewertet und beschrieben werden. In den folgenden Schritten kommen die mittels Technologiepotenzialmodell gebildeten Modellelemente zum Einsatz. So können nun die produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF) des Produktes als Problembe-schreibung formuliert werden. Für diese werden anschließend in der Phase III geeignete **abstrakte Lösungen gesucht**, um den relevanten Lösungsraum abzustecken und passende Lösungspfade aufzuzeigen. Diese werden anschließend zur Lösungsbeschreibung mit dem erwarteten Nutzenpotenzial als Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (TReF) formuliert. Die PReF und TReF vermitteln so über Abstraktion zwischen den beiden Perspektiven Produkt und Technologie als Ziel-Mittel-Kombinationen, wobei die Funktion als Bindeglied fungiert. Auf dieser Basis können nun relevante Experten identifiziert und mögliche konkrete technologische **Lösungsprinzipien recherchiert** werden.

In der Phase IV erfolgt schließlich die **detaillierte ganzheitliche Bewertung** der Lösungsprinzipien in der Funktionalitätsbewertung, Ressourceneffizienzbewertung und Kostenbewertung. Die Ergebnisse hieraus finden Eingang in die Nutzenbetrachtung der Phase V. Zur Vorbereitung von Entscheidungen können aus einer Portfoliobewertung die relevantesten Lösungsprinzipien abgeleitet und anschließend geeignete **Maßnahmen** geplant werden.

Die einzelnen **Phasen und Schritte** sind in Tab. 20 zusammengefasst.

Tab. 20: Übersicht zu Phasen und Schritten des Verfahrens

Phase	Input	Schritt	Output	Methode	Quellen (Auswahl)
I	Definition der Zielstellungen				
	vorhandene produktbezogene Daten	I.a: Auswahl Analysegegenstand	Produkt	Checkliste	unternehmensinterne Quellen
	vorhandene Strategien und Umfeldanalysen	I.b: Definition Zielstellungen	Zielstellungen		<ul style="list-style-type: none"> • unternehmens-, Produkt- und Marktstrategien • externe Anspruchsgruppen • Erfahrungen der Vorserie
II	Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme				
	RE-Parameter	II.a: Schwachstellenanalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Funktionselemente • Funktionen • Schwachstellen • Zielstellungen • Nutzenpotenziale 	<ul style="list-style-type: none"> • Funktionsanalyse • Ressourceneffizienz-Checkliste • Innovations-Checkliste 	<ul style="list-style-type: none"> • unternehmensinterne produktbezogene Daten • Erfahrungen der Vorserie • Technologiepotenzialmodell
	<ul style="list-style-type: none"> • Funktionselemente • Funktionen • Schwachstellen • RE-Parameter 	II.b: Definition Produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktion der PReF	PReF		Schwachstellenbeschreibung

Phase	Input	Schritt	Output	Methode	Quellen (Auswahl)
III	Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen				
	<ul style="list-style-type: none"> ● PReF ● Zielstellungen 	III.a: Ermittlung abstrakter Lösungen	<ul style="list-style-type: none"> ● RE-Grundprinzipien ● RE-Standardlösungen 	<ul style="list-style-type: none"> ● Analogie ● ABC-Bewertung 	<ul style="list-style-type: none"> ● Technologiepotenzialmodell ● Beschreibung der RE-Standardlösungen
	<ul style="list-style-type: none"> ● RE-Grundprinzipien ● RE-Standardlösungen ● Funktionen ● Nutzenpotenziale 	III.b: Definition der Technologie-bezogenen Ressourceneffizienz-Funktion (TReF)	TReF		
	TReF	III.c: Recherche Lösungsprinzipien	<ul style="list-style-type: none"> ● Expertenmeinungen ● Lösungsprinzipien 	<ul style="list-style-type: none"> ● Expertenidentifikation ● Literaturrecherche 	<ul style="list-style-type: none"> ● implizites Wissen (Expertenbefragungen) ● explizites Wissen (Literatur)
IV	Ganzheitliche Bewertung der Lösungen				
	<ul style="list-style-type: none"> ● Lösungsprinzipien ● Expertenmeinungen 	IV.a: Funktionalitätsbewertung	nach Funktionalitätsgrad, Korrelation und Priorität bewertete Lösungsprinzipien	House of Technology	<ul style="list-style-type: none"> ● unternehmensinterne produktbezogene Daten ● Experten
	<ul style="list-style-type: none"> ● Lösungsprinzipien ● Expertenmeinungen 	IV.b: Ressourceneffizienzbewertung	nach Ressourcenverbrauchs und Rohstoffbedarfs bewertete Lösungsprinzipien	<ul style="list-style-type: none"> ● MIPS-Methode ● Szenario-Technik 	<ul style="list-style-type: none"> ● Primär- und Sekundärquellen ● Experten
	<ul style="list-style-type: none"> ● Lösungsprinzipien ● Expertenmeinungen 	IV.c: Kostenbewertung	nach Lebenszykluskosten bewertete Lösungsprinzipien	Kapitalwertmethode	<ul style="list-style-type: none"> ● unternehmensinterne kostenbezogene Daten ● Experten
V	Planung der Maßnahmen				
	<ul style="list-style-type: none"> ● bewertete Lösungsprinzipien ● Zielstellungen 	V.a: Nutzenbetrachtung	ausgewählte Lösungsprinzipien	Netzdiagramm	Ergebnisse der Phase IV
	<ul style="list-style-type: none"> ● ausgewählte Lösungsprinzipien ● Zielstellungen 	V.b: Entscheidung vorbereiten	Projekte	Portfolio-Technik	alle bisherigen Ergebnisse

6 Umsetzung des Verfahrens

Das in Kap. 5 entwickelte Verfahren zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung unter Einsatz emergenter Technologien in der Nutzungsphase wird nun am Beispiel eines Unternehmens der Verpackungstechnik und eines Unternehmens aus dem Bereich der Fahrzeugwäsche angewendet.

6.1 Anwendung des Verfahrens bei einem Hersteller im Bereich Verpackungstechnik

6.1.1 Ausgangssituation im Unternehmen

Das Unternehmen Alpha ist ein führender **Anbieter von Gesamtlösungen für die Verpackungstechnik**. Alpha entwickelt, produziert und vertreibt weltweit Anlagen etwa für die Pharma- und Nahrungsmittelindustrie. Das Leistungsangebot umfasst Einzelmodule, aber auch komplette Leistungspakete, kundenspezifische Systeme und Komplettlösungen.

Aufgrund zunehmender Wettbewerbsintensität in bestehenden Märkten sowie zunehmender Sensibilität seitens der Kunden bezüglich des Energieverbrauchs der Produkte hat sich der Technologie- und Innovationsführer Alpha das **mittel- und langfristige Ziel** gesetzt, die Ressourceneffizienz der angebotenen Leistungen, speziell der Produkte, zu verbessern. Zudem will das Unternehmen den Trend des „Green Image“ für sich nutzen und verstärkt mit ressourceneffizienten Produkten werben sowie auf eine evtl. kommende Verschärfung der Rechtslage (vgl. Kap. 3.1.3.1) vorbereitet sein. Daraus ergibt sich der Bedarf, passende neue technologische Entwicklungen mit Ressourceneffizienzpotenzial für ausgewählte Verpackungsmaschinen zu identifizieren.

6.1.2 Beschreibung der Anwendung

6.1.2.1 Umsetzung der Phase I: Definition der Zielstellungen

Zu Beginn des Projektes wurde ein Projektteam bestehend aus Produktverantwortlichen und Vertretern der Forschung und Entwicklung zusammengestellt, das die Anwendung des Verfahrens im Unternehmen Alpha begleitete und durchführte.

Als **Analysegegenstände** wurden unter Berücksichtigung der Aspekte in Tab. 38 (vgl. Anhang, Kap. 10.3.1) **zwei Anlagen** ausgewählt; eine zur Reinigung (RA) und eine zur Trocknung (TA) von Glasgefäßen (z. B. Ampullen, Vials, Spritzen) für die Pharmaindustrie. Bei diesen Anlagen ist sowohl von einem erfahrungsgemäß großen Ressourceneinsparpotenzial als auch einer guten Übertragbarkeit der Lösungsansätze auf andere Anlagen auszugehen, da viele Standardkomponenten verbaut sind. Zudem werden diese in einer vergleichsweise hohen Stückzahl produziert, womit Rollout-Möglichkeiten eröffnet werden. Darüber hinaus werden die Anlagen in der Regel als Leistungspaket verkauft, da diese im pharmazeutischen Befüllungsprozess meist zusammen eingesetzt werden. Insofern galt es in der Anwendung des Verfahrens auch, mögliche Wechselwirkungen zwischen den Anlagen zu berücksichtigen.

Allgemeine **Zielstellungen** des Unternehmens waren die Ermittlung möglicher Einsparpotenziale für den jeweiligen Anwendungsfall sowie eine bewertete Ausarbeitung zu neuen Technologien, mit denen die Ressourceneffizienz verbessert werden kann. Im Einzelnen wurden folgende Ziele festgelegt:

- Technische Unternehmens-Zielstellungen (Z_{T1}): Die Wahrung bzw. der Ausbau der Positionierung als Technologieführer
- Ressourcennutzungsbezogene Unternehmens-Zielstellungen (Z_{R1}): Die Positionierung als umweltfreundliches Unternehmen bei einer gleichzeitig proaktiven Absiche-

ung gegenüber künftigen regulativen umwelt- / klimaschutzbezogenen Anforderungen

- Ökonomische Unternehmens-Zielstellungen ($Z_{\Delta 1}$): Die Sicherung existierender und die Erschließung neuer Märkte
- Technische Produkt-Zielstellungen (Z_{T2}): Die Unterstützung bei der Schaffung des technisch innovativsten Produkt(systems) der Produktklasse unter Wahrung geltender Pharma-Richtlinien, z. B. der FDA
- Ressourcennutzungsbezogene Produkt-Zielstellungen (Z_{R2}): Die seitens der Kunden geforderte Reduktion der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren Energieträgern und der sparsame Einsatz von Wasser
- Ökonomische Produkt-Zielstellungen ($Z_{\Delta 2}$): Der Investitionsaufwand für die potenziellen Lösungsansätze sollte an dieser Stelle von untergeordneter Bedeutung bleiben

6.1.2.2 Umsetzung der Phase II: Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme

Zu Beginn der Schwachstellenanalyse wurden die beiden Anlagen in Komponenten bzw. **Funktionselemente** zerlegt und anschließend zugehörige **Funktionen** ermittelt (vgl. Tab. 21).¹⁴⁴ Beispielsweise wurde für die TA das Funktionselement „Heizteil“ (FE4) u. a. mit der Funktion „Gefäße trocknen“ (F4b) benannt.

Anschließend wurden im Rahmen eines moderierten Workshops mittels Ressourceneffizienz-Checkliste material- und prozessbezogene Schwachstellen der Produkte während der Nutzung zusammengetragen und benannt (Tab. 21). Der Großteil der identifizierten Schwachstellen ist prozessbezogen und bezieht sich auf die Ressourcenkategorie *Energie*. Bei der **Ermittlung der Schwachstellen** wurden auch solche identifiziert, die inhaltlich nicht exakt dem Betrachtungszuschnitt dieses Verfahrens entsprachen.¹⁴⁵ Generell wurde in solchen Fällen primär nach der eingeschätzten Wichtigkeit der Fragestellung für die Kunden von Alpha entschieden.

¹⁴⁴ Diese Darstellung zeigt nur eine Auswahl der erarbeiteten Liste, da einige Komponenten wie Filter, Motoren, Pumpen, Wärmetauscher, Absperrklappen/Schottwände, Rohrsystem, Ultraschallbad etc. aufgrund der vergleichsweise geringen Relevanz im späteren Verlauf des Verfahrens unberücksichtigt blieben. In diesen Fällen wurde davon ausgegangen, dass hierfür keine neuen technologischen Lösungsprinzipien im Sinne des Verfahrens umsetzbar sind, da es sich etwa um Zukaufteile handelt.

¹⁴⁵ Dazu gehörten solche Schwachstellen, die nicht ausschließlich bzw. vordergründig in der Nutzungsphase zum Tragen kommen. Beispielsweise wirkt sich die Schwachstelle „Teurer und ökologisch aufwändiger Materialeinsatz von Edelstahl in den Außenwänden“ (SS8b) der TA in erster Linie in der vorgelagerten Phase der Stahlherzeugung bzw. Materialbeschaffung aus. Da bei geringerem Materialeinsatz bzw. der Verwendung eines leichteren Materials auch Einsparungen während der Nutzung etwa beim Transport der Anlage denkbar sind, wurde diese Schwachstelle dennoch in die Analyse mit aufgenommen. Die erarbeitete Schwachstelle „hohe Schallemission der Gesamtanlage über die Außenwände“ wurde nicht als solche aufgenommen, da Emissionen als Outputgröße nicht Gegenstand des Verfahrens sind. Schallschutz wurde aber als Anforderung im Rahmen der Schwachstellenbeschreibung (Gliederungspunkt c) der Schwachstelle SS8a (vgl. Tab. 21) vermerkt.

Tab. 21: Auswahl von Funktionselementen, Funktionen und Schwachstellen der Anlagen des Unternehmens Alpha

Funktionselement (FE)	Funktion (F)	Schwachstelle (SS)
Trocken und Sterilisieranlage (TA)		
FE1: Transportsystem	F1: Gefäße transportieren	SS1: energieineffizientes Aufheizen und Abkühlen des Transportbands (Abrieb zwischen den Gläsern vermeiden)
FE2: Ventilatoren (inkl. Heißluftventilatoren, Luftführung)	<ul style="list-style-type: none"> • F2a: Frischluft ansaugen • F2b: Laminar-Flow-Strom erzeugen 	SS2: Ventilatoren haben im Betrieb einen hohen Energieverbrauch (schlechter Wirkungsgrad)
FE3: Umluftkanal (inkl. Abzug)	F3: Luftstrom führen	SS3: im Umluftkanal tritt Wärmeverlust im Betrieb auf
FE4: Heizteil (inkl. Heizregister mit zwei Heizkreisen)	<ul style="list-style-type: none"> • F4a: Gefäße sterilisieren und entpyrogenisieren • F4b: Gefäße trocknen • F4c: Gefäße Silikon-einbrennen 	<ul style="list-style-type: none"> • SS4a: energieineffiziente Erzeugung heißer Luft im Heizteil • SS4b: auf den energetischen Wirkungsgrad bezogener suboptimaler Aufbau des Heizteils • SS4c: energieineffizienter und langer Aufheizprozess auf die Betriebstemperatur der Anlage (ca. 4 Min)
FE5: Brüdenkondensationsanlage	F5: Wasserdampf abführen	SS5: Wärmeverlust in der Brüdenkondensationsanlage
FE6: Silikonisierstation (inkl. Zerstäuber, Umwälzpumpe)	F6: auftragen von Silikon (auf Produktinnenfläche)	SS6: relativ hoher Materialverbrauch (Silikon) der Silikonisierstation
FE7: Kühlteil (Kühlmedium: Luft/Wasser)	F7: Gefäße abkühlen	SS7: Wärmeaustausch über Zonen und Überdruckregelung suboptimal (eher konstruktives Problem)
FE8: Außenwände der TA	<ul style="list-style-type: none"> • F8a: Trägerstruktur sicherstellen • F8b: Dämmung leisten 	<ul style="list-style-type: none"> • SS8a: suboptimale Wärmeisolation der Stahl-Außenwände (Wärmebrücken) der TA • SS8b: teurer und ökologisch aufwändiger Materialeinsatz von Edelstahl in den Außenwänden der TA
Reinigungsanlage (RA)		
FE10: Abdeckhaube (inkl. pneumatische Hebevorrichtung)	<ul style="list-style-type: none"> • F10b: Reinigungsraum abdecken und isolieren • F10c: Eingriff in den Reinigungsraum ermöglichen • F10d: Durchsicht ermöglichen 	SS10: suboptimale Wärmeisolierung der Abdeckhaube
FE11: Innen- und Außenreinigung (inkl. Brausekopf-Spritznadeln, Düsen)	<ul style="list-style-type: none"> • F11b: Gefäße von innen reinigen • F11c: Gefäße von außen reinigen 	<ul style="list-style-type: none"> • SS11a: hoher Wasserverbrauch der Innen- und Außenreinigung • SS11b: Druckluftverbrauch der Innen- und Außenreinigung
FE12: Reinigungswanne	F12: Wasser aufnehmen und ab-	SS12: suboptimale Wärmeisolie-

Funktionselement (FE)	Funktion (F)	Schwachstelle (SS)
	führen	rung Reinigungswanne
FE13: Sensoren, Regelungs- und Steuerungstechnologie der RA	F13: Anlage überwachen und steuern	<ul style="list-style-type: none"> • SS13: fehlendes Monitoring der Gesamtanlage für Energie • SS13: fehlendes Monitoring der Gesamtanlage für Wasser
FE14: Wasserbehälter mit Heizungen (inkl. Tauchheizkörper)	F14: Wasser erwärmen (WFI-Wasser auf 60° – 80 °C)	<ul style="list-style-type: none"> • SS14a: energieineffiziente Aufheizung des Wassers • SS14b: suboptimale Wärmeisolierung des Wasserbehälters

Nun wurden die identifizierten Schwachstellen in der **Schwachstellenbeschreibung** mittels Innovations-Checkliste beschrieben. Diese Beschreibung wurde nur für die aus Sicht Alphas acht besonders relevanten Schwachstellen dokumentiert (vgl. Tab. 23 im nächsten Kap.). Zudem wurden solche Schwachstellen gruppiert betrachtet, die zu einem Funktionselement gehören. Dies galt etwa für das Funktionselement „Heizteil“ der TA, für das die folgende Tab. 22 die Dokumentation der Schwachstellenbeschreibung zeigt.

Tab. 22: Schwachstellenbeschreibung für das „Heizteil“ im Unternehmen Alpha

Schwachstellenbeschreibung „Heizteil“ (FE4)
a) Informationen zur Schwachstelle
<p>Die Energieeffizienz des „Heizteils“ in der TA wurde insgesamt als schlecht eingeschätzt. Als bekannte Schwachstellen wurden die aus Tab. 21 identifiziert.</p> <p>In dem Heizteil werden nur 60 % der installierten Leistung (250 kW) genutzt. Diese Toleranz ist allerdings notwendig, um die geforderte Temperatur an den Gefäßen von ca. 300 Grad Celsius zu erreichen, die neben der Trocknung der Gefäße nach vorheriger Reinigung eine vollständige Entpyrogenisierung¹⁴⁶ sicherstellt. Darüber hinaus ist etwa der untere Abschnitt des Heizkörpers stärker als der obere belastet.</p> <p>Im Unternehmen liegen Erfahrungen zur Infrarot-Technologie vor, da diese in früheren Jahren zur Trocknung in ähnlichen Anwendungen eingesetzt wurde. Aufgrund der besseren Steuerbarkeit wird aber seit dieser Zeit die elektrische Variante des Heizregisters eingesetzt. Zur Sterilisierung der Gefäße ist H₂O₂, zu dem im Unternehmen ebenfalls Erfahrungen vorliegen, keine Alternative.</p>
b) Einordnung als Standardproblem
<p>Bezüglich der gewählten Zuordnung der Schwachstellen zu RE-Parametern siehe Tab. 23 im nächsten Kap..</p> <p>Da das „Heizteil“ mit den Funktionen „Gefäße sterilisieren und entpyrogenisieren“, „Gefäße trocknen“, „Gefäße Silikoneinbrennen“ zentrale Aufgaben des Produktsystems der beiden Anlagen bedient, ist es von großer Systemrelevanz. Die Wirkdimension betrifft demnach das Produktsystem, da die potenzielle Lösung das Produkt im Ganzen unter Beachtung weitere Anlagen bzw. Prozessschritte während der Nutzung beeinflussen kann.</p> <p>Bezüglich möglicher Änderungen des Systems sind keine speziellen Grenzen vorgegeben. Einzig die Anschlussfähigkeit zu weiteren Prozessschritten muss gewährleistet bleiben.</p>
c) Anforderungen für Lösungsprinzipien

¹⁴⁶ Hierunter ist die Entfernung bzw. das Unschädlichmachen von Pyrogenen, die auch unter extremen Bedingungen eine hohe Beständigkeit aufweisen, zu verstehen (Zetkin, Schaldach 2005).

Schwachstellenbeschreibung „Heizteil“ (FE4)

Für die künftigen Lösungsprinzipien des Heizteils zur Neutralisation der Schwachstellen wurden folgende Zielstellungen bestimmt:

- Technische Lösungs-Zielstellungen (Z_{T3}): Gewährleistung einer minimalen Entkeimungsstufe (3log)

Bezüglich des zu bestimmenden Nutzenpotenzials wurden folgende minimale Ausprägungen festgelegt:

- Leistung: gleich (muss unbedingt gewährleistet sein, zusätzliche Leistungen wären wünschenswert)
- Ressourceneffizienz: höher (diese sollte idealerweise höher liegen)
- Kosten: gleich (die höhere Investition sollte durch einen geringeren Energieverbrauch in der Nutzungsphase ausgeglichen werden)

Anschließend wurden mit diesen Informationen und Tab. 7 aus Kap. 4.1.3.1 für alle Schwachstellen die **PReF** bestimmt. Diese sind in Tab. 23 des nächsten Kap. dargestellt.

6.1.2.3 Umsetzung der Phase III: Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen

In der Umsetzung der Phase III galt es, für die ermittelten **PReF** beider Anlagen die **abstrakten Lösungen** als RE-Grundprinzipien und die zugehörige Liste an RE-Standardlösungen zu bestimmen (vgl. Tab. 23). Dabei wurden bereits erste, nicht direkt passend scheinende RE-Grundprinzipien und RE-Standardlösungen aussortiert, um deren Anzahl gering zu halten.¹⁴⁷

Der Schritt der **Bewertung der prinzipiellen Eignung** wurde übersprungen, da die Zahl der RE-Standardlösungen im handhabbaren Bereich lag und eine weitere Einschränkung des Lösungsraums an dieser Stelle nicht notwendig schien.

Anhand der Beschreibungselemente der formulierten **TReF** aus Tab. 23 wurden nun **Experten recherchiert** und identifiziert. Hierzu wurde zunächst eine Experten-Datenbank mit rund 50 Experten aus den für die Kombinationen aus **PReF** und **TReF** mit Schwerpunkt auf die relevanten Bereiche Heiztechnologien, Wärmerückgewinnung und Isolation sowie Reinigungstechnologien aufgebaut. Die Experten entstammen aus relevanten Universitätsinstituten und Fraunhofer-Instituten wie der Fraunhofer Allianz Reinigungstechnologie. Zunächst wurden ca. 20 telefonische Kurzinterviews geführt, um die Richtigkeit der Rechercheergebnisse zu überprüfen und die Bereitschaft einer möglichen Zusammenarbeit abzufragen. Fünf Experten wurden für die vertiefenden Interviews ausgewählt. Bei den Experten handelte es sich einerseits um Gruppen- bzw. Abteilungsleiter, die eine hohe Expertise in den gewählten Themenbereichen haben. Andererseits wurden auch zwei Experten mit stärkerem Überblickswissen interviewt. Diese waren ein Sprecher der Fraunhofer Allianz Reinigungstechnologien und ein Geschäftsfeldleiter im Bereich Bauen und Isolation. Für die Durchführung der Interviews wurde ein Gesprächsleitfaden entwickelt (siehe Tab. 42 im Anhang, Kap. 10.4).

Ergebnis der geführten Interviews war eine **Liste relevanter Lösungsprinzipien** (vgl. Tab. 23). Weitere Lösungsprinzipien wurden mittels anderer Quellen wie einer aktuellen Forschungsroadmap zum Thema Energieeffizienz identifiziert. Für alle insgesamt 19 identifizierten Lösungsprinzipien wurden anschließend Steckbriefe ausgefüllt (vgl. Abb. 20 in Kap. 5.3.2.3). Dabei wurden für alle **PReF-TReF**-Kombinationen, aber nur für etwa jede zweite RE-Standardlösung passende Lösungsprinzipien erarbeitet (vgl. Tab. 23). Bei der Auswahl blieben solche Lösungsprinzipien unberücksichtigt, die dem Stand der Technik entsprachen. Dies galt etwa für das von einem Experten angeführte Lösungsprinzip eines angepassten Düsendesigns unter Verwendung einer Zweistoffdüse für die Funktion (F_8) „Wasser erwärmen“ (vgl. Tab. 23).

¹⁴⁷ Dies galt etwa im Falle der **PReF** des „Heizteils“ (**PReF₁**) für das RE-Grundprinzip *Steigerung der Effizienz* (GP2) oder die RE-Standardlösung *Steuerung* (SL) als mögliche Lösung zu der *Optimierung der Kreislauffähigkeit* (GP5). Hier wurden seitens Alpha keine passenden Lösungsprinzipien erwartet.

Tab. 23: Produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF), Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (TReF) und identifizierte Lösungsprinzipien des Unternehmens Alpha

Nr.	PReF		Funktionen	TReF		Identifizierte Lösungsprinzipien	
	Schwachstellen (Kurzform)	Funktions-elemente		RE-Parameter	RE-Grundprinzipien		Nutzenpotenzial
4a	SS4a: energieeffiziente Erzeugung heißer Luft	FE4: Heizteil (inkl. Heizregler mit zwei Heizkreisen)	PEP	Optimierung der Kreislauf-fähigkeit (GP5)	<ul style="list-style-type: none"> Systemabschluss Flexibilisierung Alternative Wirkprinzipien 	<ul style="list-style-type: none"> Leistung: gleich Ressourceneffizienz: höher Kosten: höher 	<ul style="list-style-type: none"> Trocknung mit überhitztem Wasserdampf (L1) Wärmezufuhr durch Infrarotstrahlung (L2)
4b	SS4b: auf den energetischen Wirkungsgrad bezogener suboptimaler Aufbau	FE4: Heizteil (inkl. Heizregler mit zwei Heizkreisen)	PEF	Steigerung der Effizienz (GP2)	<ul style="list-style-type: none"> Miniaturisierung Multifunktionalität Bionik Flexibilisierung Oberflächenfunktionalisierung Steuerung 	<ul style="list-style-type: none"> Leistung: gleich Ressourceneffizienz: höher Kosten: höher 	<ul style="list-style-type: none"> Sensoren und Aktoren zur gezielten Steuerung (L3) Drahtlose und energieautonome Sensoren (L4)
4c	SS4c: energieeffizienter und längerer Aufheizprozess	FE4: Heizteil (inkl. Heizregler mit zwei Heizkreisen)	<ul style="list-style-type: none"> PEPS PEP 	<ul style="list-style-type: none"> Steigerung der Effizienz (GP2) Optimierung der Kreislauf-fähigkeit (GP5) 	<ul style="list-style-type: none"> Flexibilisierung Steuerung Alternative Wirkprinzipien 	<ul style="list-style-type: none"> Leistung: gleich Ressourceneffizienz: höher Kosten: höher 	<ul style="list-style-type: none"> Niederdruckplasma (L5) Mikrowellentechnologie als Zusatztechnologie zur Trocknung (L6)
8a	SS8a: suboptimale Wärmeisolation	FE8: Außenwände der TA	MEPS	<ul style="list-style-type: none"> Steigerung der Effizienz (GP2) Optimierung der Kreislauf-fähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Systemabschluss Miniaturisierung Multifunktionalität Bionik 	<ul style="list-style-type: none"> Leistung: zusätzliche Ressourceneffizienz: höher Kosten: höher 	<ul style="list-style-type: none"> Dämmung mit Aerogel (L7) „Low-e-Lack“ (Senkung von Wärmeverlusten) (L8) zelluläre Werkstoffe (Metallschaum und Hohlkugeln)

Nr.	PReF		Funktionen	TReF		Identifizierte Lösungsprinzipien
	Schwachstellen (Kurzform)	Funktions-elemente		RE-Parameter	RE-Grundprinzipien (GP5)	
8b	SS8b: teurer und ökologisch aufwändiger Materialeinsatz	FE8: Außenwände der TA	MMP	F8b: Dämmung leisten, abdichten	<ul style="list-style-type: none"> Verlängerung der Lebensdauer (GP4) Substitution von Ressourcen (GP2) 	<ul style="list-style-type: none"> RE-Standardlösungen (für unterstrichene wurden Lösungsprinzipien gefunden) <ul style="list-style-type: none"> Flexibilisierung Oberflächenfunktionalisierung Leistung: gleich Ressourceneffizienz: höher Kosten: höher
10	SS10: suboptimale Wärmeisolierung	FE10: Abdeckhaube (inkl. pneumatische Hebevorrichtung)	MEF	F10b: Reinigungsraum abdichten und isolieren	<ul style="list-style-type: none"> Substitution von Ressourcen (GP2) 	<ul style="list-style-type: none"> Leistung: zusätzliche Ressourceneffizienz: höher Kosten: höher
11	SS11a: hoher Wasserverbrauch	FE11: Innen- und Außenreinigung (inkl. Brausekopf, Spritznadeln, Düsen)	PWF	F11b: Gefäße von außen und innen reinigen	<ul style="list-style-type: none"> Steigerung der Effizienz (GP2) Minderung von Abfall/Ausschuss (GP3) 	<ul style="list-style-type: none"> Leistung: gleich Ressourceneffizienz: höher Kosten: höher
14	SS14b: suboptimale Wärmeisolierung	FE14: Wassertank mit Heizungen (inkl. Tauchsheizkörper)	MEF	F14: Wasser erwärmen (auf 60° – 80° C)	<ul style="list-style-type: none"> Substitution von Ressourcen (GP2) 	<ul style="list-style-type: none"> Leistung: gleich Ressourceneffizienz: höher Kosten: höher

6.1.2.4 Umsetzung der Phase IV: Ganzheitliche Bewertung der Lösungen

Die recherchierten Lösungsprinzipien wurden nun zur **Funktionalitätsbewertung** in das House of Technology übertragen, um diese den zugehörigen PReF gegenüberzustellen und die jeweilige Funktionalität, Korrelation und Priorität zu bestimmen (vgl. Abb. 30). Dabei konnten auch unterschiedliche technologische Reifegrade der Lösungsprinzipien identifiziert werden. Für das Lösungsprinzip „Dämmung mit Aerogel“ (L7) existiert beispielsweise bereits ein kommerziell erhältliches Produkt auf Aerogel-Basis. Demgegenüber ist etwa das Lösungsprinzip „Niederdruckplasma“ (L5) noch im Forschungsstadium, womit auch eine nicht gesicherte (unklare) Kompatibilität (vgl. Tab. 14 in Kap. 5.4.2.1) einhergeht.

Bei der Bewertung konnten zwei Lösungsprinzipien ausgeschlossen werden. Gründe hierfür waren die nicht gesicherte Funktionserfüllung des Lösungsprinzips für das spezifische Funktionselement oder die fehlende spezifische Anwendbarkeit für die PReF. So wurde das Lösungsprinzip „elektrisch aktiviertes Wasser“ (L17) verworfen, da der beabsichtigte sterilisierende Effekt des Wassers nicht unter den in der Anlage vorherrschenden Bedingungen greift.

Für die übrigen 17 Lösungsprinzipien wurde ein Wert für die Priorität bestimmt. Als Ergebnis konnten fünf besonders passende Lösungsprinzipien identifiziert werden, die hinsichtlich der Funktionalität und der Korrelation allen Anforderungen der PReF entsprachen und daher auch die höchsten Prioritäten aufwiesen. Die ermittelten Leistungsgrade finden sich in Tab. 25. Im Vorfeld wurden die zu einem Funktionselement gehörenden Funktionen ggf. zu einer Hauptfunktion zusammengefasst bzw. weniger relevante gestrichen (vgl. Tab. 23 des vorherigen Kap.), um alle *repräsentativen Kennzahlen* auf eine Funktion je PReF-TReF-Kombination beziehen zu können.

		Korrelationsgrade						
		0,8	1	1	1,1		0,9	
		Trocknung mit überhitztem Wasserdampf (L1)	Wärmezufuhr durch Infrarotstrahlung (L2)	Dämmung mit Aerogel (L7)	Stromerzeugung durch Nutzung der Abwärme (L11)	...	Reinigen mit CO ₂ (L16)	...
Gewichtung	Nr. der PReF							
	4a	3	9	-	9			
	4b	-	-	-	9			
	4c	-	-	-	-			
	8a	-	-	9	0			
	8b	-	-	9	0			
	10	3						
	11	2						
	14	3						
Priorisierung		7,2	27	45	50		24	
Ranking		5	3	2	1		4	

Abb. 30: Bewertung der Funktionalität, Korrelation und Priorität der fünf besonders relevanten Lösungsprinzipien im Unternehmen Alpha

In der folgenden Ressourceneffizienzbewertung wurden die fünf gewählten Lösungsprinzipien hinsichtlich des **Ressourcenverbrauchs** mittels der MIPS-Methode bewertet und die MIPS-Werte bestimmt (vgl. Tab. 25). Dafür wurden die relevanten Lebenszyklusphasen entsprechend der Art des Lösungsprinzips nach der Tab. 15. des Kap. 5.4.2.2 identifiziert. Beispielsweise sind für das Lösungsprinzip „Reinigen mit CO₂“ (L16) mit der Funktion „Gefäße reinigen“ aufgrund des komplexen Aufbaus neben der Nutzungsphase auch die sekundären Bilanzierungsgrenzen für den Ressourcenverbrauch und den Ressourcenbedarf relevant. Das existierende Referenzlösungsprinzip, das dieselbe Funktion in der RA erfüllt, ist die Technologie „Reinigen mit Wasser“ (LR18). Für beide Varianten ergeben sich bestimmte aufsummierte MIPS-Werte (Tab. 24), deren Ermittlung in Tab. 43 des Anhangs (Kap. 10.4) mit Zwischenergebnissen im Einzelnen dargestellt ist. Wie in Kap. 5.4.2.2 erläutert, wurden unverändert benötigte Komponenten wie etwa jene zur Zu- und Abführung der Gefäße nicht bilanziert. Die aufsummierten MIPS-Werte aller fünf Lösungsprinzipien zeigt die Tab. 25.

Tab. 24: MIPS-Werte (bezogen auf den Verbrauch von abiotischem Material) der Referenzlösung „Reinigen mit Wasser“ (LR18) und des neuen Lösungsprinzips „Reinigen mit CO₂“ (L18) des Unternehmens Alpha

Lebenszyklusphase	Lösungsprinzip „Reinigen mit CO ₂ “ (L16)	Referenzlösungsprinzip „Reinigen mit Wasser“ (LR1)	Annahmen / Kommentare
Vorgelagerte Phase	8 [t]	6 [t]	
Nutzung	20.932 [t]	5.227 [t]	<ul style="list-style-type: none"> ● Lebensdauer: 10 Jahre, Wartung: 2 mal ● CO₂ Verbrauch: 300 g/min
Nachgelagerte Phase	0 [t]	0 [t]	wurde als nicht relevant erachtet
Summe	20.940 [t]	5.233 [t]	
MIPS-Wert	0,82 [kg/Gefäß]	0,20 [kg/Gefäß]	Gefäß: eine Injektionsflasche eines bestimmten Typs

Die Bewertung der Lösungsprinzipien wurde einerseits mit Hilfe der involvierten Experten und Lösungsanbieter sowie dem Hinzuziehen von relevanten Veröffentlichungen ermöglicht. Andererseits galt es, seitens Alpha die internen Daten zu den Referenzlösungsprinzipien und den Einsatzbedingungen der Produkte beim Kunden (beispielsweise Standzeiten, Rüstzeiten, Instandhaltung) zur Verfügung zu stellen. Die benötigten MIT-Werte wurden über die frei zugänglichen Listen ermittelt oder neu berechnet (vgl. Kap. 3.2.3.2.2). In den meisten Fällen waren nur **bruchstückhaft** Daten vorhanden, weshalb einige Annahmen getroffen wurden, vgl. hierzu Tab. 43 im Anhang (Kap. 10.4).

Anschließend wurde der **künftige Ressourcenbedarf** von dem ausgewählten Lösungsprinzip „Stromerzeugung durch Nutzung der Abwärme“ (L11) bewertet. Dies geschah unter Verwendung einschlägiger Literatur wie die von ANGERER et al. verfasste Studie *Rohstoffe für Zukunftstechnologien* (Angerer et al. 2009) und Analysen etwa zum Rohstoffversorgungs-Risiko-Rating des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln (vgl. Kap. 5.4.2.2). Bei diesem Lösungsprinzip konnte im Gegensatz zu den anderen vier von einer evtl. unsicheren Rohstoffsituation bzw. einer großen Abhängigkeit von der Verfügbarkeit ausgegangen werden. Hierzu wurden für die Ressourcen mit hohen MIPS-Werten des L11 (Tellur, Silber, Antimon, Germanium und Wismut) anhand Tab. 17 im Kap. 5.4.2.2 mögliche Projektionen gewählt, mit denen die charakteristischen Entwicklungsmöglichkeiten beschrieben werden konnten. So wurden zwei **Szenarios** ermittelt und folgendermaßen kurz zusammengefasst:

- anhaltende wirtschaftliche Stagnation (Szenario 1): In diesem Szenario ist aufgrund

der global abnehmenden Wirtschaftsleistung von keiner Verknappung an Tellur, Silber, Antimon, Germanium und Wismut auszugehen, da diese Rohstoffe für einfachere technologische Lösungen nicht benötigt werden. Forschungstätigkeiten hinsichtlich neuer technologischer Lösungen, die etwa seltene Metalle benötigen, werden reduziert und andere globale Interessen wie die Sicherung der Ernährung rücken in den Vordergrund.

- anziehendes Wirtschaftswachstum (Szenario 2): In diesem Szenario ist aufgrund des anhaltenden Wirtschaftswachstums und der damit einhergehenden globalen Wohlstandszunahme von einem zunehmenden Bedarf an Tellur, Silber, Antimon, Germanium und Wismut auszugehen, da diese wichtige Rohstoffe für zentrale Zukunftstechnologien darstellen.¹⁴⁸

Nach Betrachtung dieser beiden Szenarios wurde im Szenario 2 das Risiko „starke Verbreitung der Technologie“ für das L11 erkannt. Dieses wurde im Portfolio (vgl. Abb. 26 in Kap. 5.4.2.2) bewertet. Die Auswirkungen des Risikos für das Gestaltungsfeld wurden mit „hoch“ und die Eintrittswahrscheinlichkeit des Risikos mit „gering“ bewertet (dies entspricht dem 2. Quadranten im Portfolio).

In der Phase der **Kostenbewertung** wurden die entstehenden Lebenszykluskosten aller fünf Lösungsprinzipien mittels der Formel 6 im Kap. 5.4.2.3 berechnet (Tab. 25). Die hierfür benötigten Zwischenrechnungen und Annahmen sind exemplarisch für den Fall des Lösungsprinzips L18 in der Tab. 44 im Anhang (Kap. 10.4) aufgeführt. Dabei wurden die Kosten sehr grob auf Basis der erstellten Lebenszyklusbeschreibung des vorherigen Schritts bestimmt, da dies für das Unternehmen Alpha an dieser Stelle von vergleichsweise untergeordneter Relevanz war (vgl. Zielstellungen in Kap. 6.1.2.1). Relativ einfach waren die Kosten für das Lösungsprinzip (L14) zu ermitteln, da dieses bereits in einer anwendbaren Form (als Dämmmatten) auf dem Markt verfügbar war.

In der folgenden Tab. 25 sind sämtliche in der Phase IV ermittelten **repräsentativen Kennzahlen** aufgeführt.

¹⁴⁸ Der Ressourcenerbrauch für einen einzelnen thermoelektrischen Generator zur Stromerzeugung durch Nutzung der Abwärme“ (L11) ist gering. Bei einer stärkeren Verbreitung der Technologie könnte jedoch eine zunehmende Nachfrage nach relevanten Ressourcen entstehen. Der künftige Ressourcenbedarf der Technologie für L11 ist daher als risikobehaftet einzuschätzen (vgl. Angerer et al. 2009).

Tab. 25: Übersicht der repräsentativen Kennzahlen der Bewertung aller Lösungsprinzipien des Unternehmens Alpha (Lebensdauer der Anlage beträgt zehn Jahre)

Lösungsprinzip	Funktion	4a	8a	8b	11	beispielhafte Annahmen
	Kennzahl					
Referenzlösung	Leistungswert	5300 Stück/h	0,0026 W ⁻¹	0,0026 W ⁻¹	3000 Stück/h	Steinwolle: Λ= 0,04 W/m*K Λ= 384 W; Heizstab: 24 kW (Nennleistung)
	Ressourceneffizienzwert	15,9 g/Gefäß	198,57 kg/W ⁻¹	658,64 kg/W ⁻¹	197 g/Gefäß	
	Kostenwert	-268195 €	-1820 €	-5460 €	-714142 €	Zinssatz: 5 %
Trocknung mit überhitztem Wasserdampf (L1)	Leistungswert	5300 Stück/h				Dampferzeuger: 460 kg/h bzw. 300 kW
	Ressourceneffizienzwert	13,8 g/Gefäß				
	Kostenwert	-301497 €				Zinssatz: 5 %; Dampferzeuger: 24900 €/stk
Wärmezufuhr durch Infrarotstrahlung (L2)	Leistungswert	5300 Stück/h				
	Ressourceneffizienzwert	8,6 g/Gefäß				Lebensdauer Strahler: 5000 h
	Kostenwert	-174079 €				Zinssatz: 5 %; Infrarotmodul 1819 €/stk
Dämmung mit Aerogel (L7)	Leistungswert		0,0052 W ⁻¹			Λ= 0,02 W/m*K, Dicke: 0,1 m, ΔT= 240 K, Stromersparnis:192 W
	Ressourceneffizienzwert		1,48 kg/W ⁻¹			
	Kostenwert		-1882 €			Zinssatz: 5 %
Stromerzeugung durch Abwärme (L11)	Leistungswert			0,000038 W ⁻¹		Maximale Leistung: 40 W bei ΔT= 240 K; Stromgewinn: 640 W
	Ressourceneffizienzwert			183 kg/W ⁻¹		Stromverbrauch: 0 W
	Kostenwert			-860 €		Zinssatz: 5 %; 16 Generatoren: 53,80 €/stk
Reinigen mit CO ₂ (L16)	Leistungswert				3000 Stück/h	Leistung der Maschine bleibt erhalten
	Ressourceneffizienzwert				817 g/Gefäß	
	Kostenwert				-1176551 €	Zinssatz: 5 %

Legende: Λ: Wärmeleitkoeffizient, ΔT: Temperaturdifferenz

6.1.2.5 Umsetzung der Phase V: Planung der Maßnahmen

Entsprechend der vorgenommenen Bewertungen wurde nun der **Nutzen** der einzelnen Lösungsprinzipien bezogen auf die neun Nutzenfaktoren ermittelt. Die Informationen wurden aus den erarbeiteten Zielstellungen in Kap. 6.1.2.1, den Bewertungen zur Funktionalität (vgl. Abb. 30 im vorherigen Kap.) sowie den ressourceneffizienz- und kostenbezogenen Bewertungen (vgl. Tab. 25) zusammengetragen und entsprechend Tab. 18 in Kap. 5.5.2.1 in die Ausprägungen der Nutzenfaktoren überführt. Abb. 31 zeigt das daraus erstellte Netzdiagramm (aus Gründen der Übersicht nur für die Lösungsprinzipien L1, L2 und L16 sowie deren Referenzlösungsprinzipien R4a und R11).

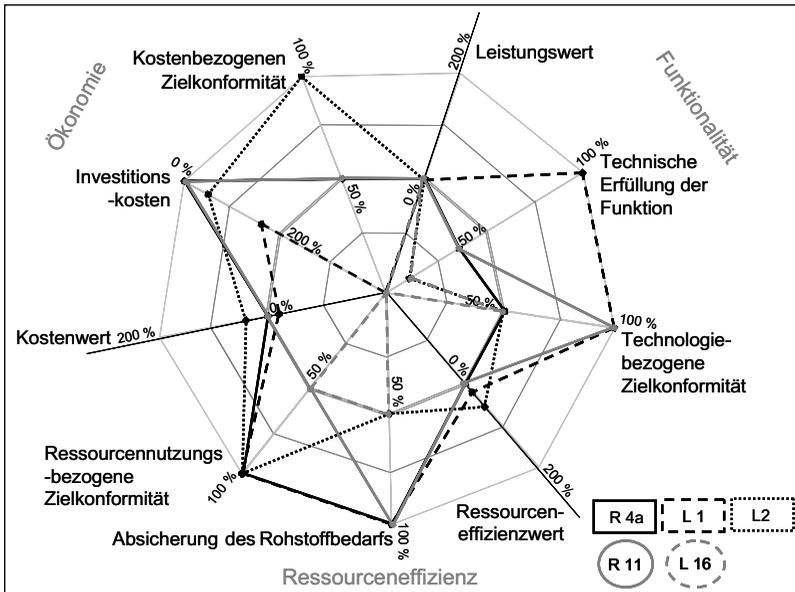


Abb. 31: Darstellung des ganzheitlichen Nutzens von Lösungsprinzipien im Unternehmen Alpha

Es ist ersichtlich, dass die Lösungsprinzipien hinsichtlich aller drei Dimensionen unterschiedliche Profile aufweisen. Insbesondere das L16 zeigt einen vergleichsweise geringen ganzheitlichen Nutzen.

Zur **Umsetzungsplanung** der favorisierten Lösungsprinzipien wurden auf Basis der Portfoliobetrachtung (vgl. Abb. 32) und der gesamten Diskussionen mit den eingebundenen Experten individuelle Strategien für das weitere Vorgehen festgelegt.

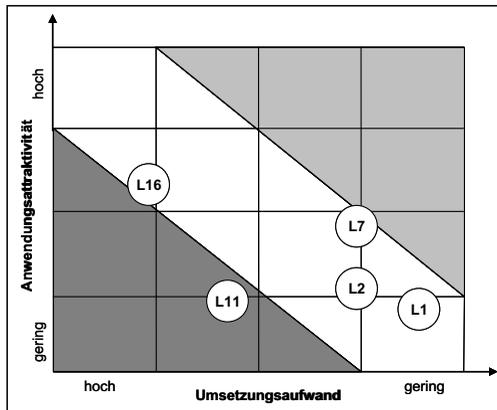


Abb. 32: Portfolio zur Auswahl der Lösungsprinzipien im Unternehmen Alpha

Beispielsweise wurden **Maßnahmen** für Labortest und tiefergehende Analysen definiert mit dem Ziel, die technische Funktionsfähigkeit zu testen und den weiteren Umsetzungsaufwand abschätzen zu können. Für das Lösungsprinzip „Reinigen durch CO₂“ (L16) wurden aufgrund der hohen Anwendungsattraktivität und trotz der vergleichsweise ungünstigen Ressourceneffizienz- und Ökonomiebewertung (vgl. Tab. 25) erste Tests mit verschiedenen Glasbehältnissen des Unternehmens Alpha in Versuchsaufbauten beim Fraunhofer-Institut C durchgeführt. Zielsetzung war hierbei insbesondere, mehr Daten zu der Reinigungswirkung des CO₂ unter repräsentativen Anwendungsbedingungen zu generieren. Für das Lösungsprinzip „Dämmung mit Aerogel“ (L7) wurden aufgrund der hierdurch evtl. ermöglichten Energieeinsparung in der Nutzungsphase der TA ebenfalls erste Tests mit einem kommerziell erhältlichen Produkt durchgeführt.

6.1.3 Nutzen der Anwendung für das Unternehmen Alpha

Durch die Anwendung des Verfahrens beim Unternehmen Alpha konnten ausgehend von 20 erarbeiteten ressourcenverbrauchsbezogenen Schwachstellen der Produkte Trocknungsanlage und Reinigungsanlage 18 mögliche neue Lösungsprinzipien mit Ressourceneffizienzpotenzial identifiziert werden. Von denen wurden die fünf **interessantesten Lösungsprinzipien** ausgewählt und ganzheitlich bewertet. Erste konkrete Maßnahmen sollen diese schließlich in einer nächsten Produktgeneration implementieren helfen.

Dem Unternehmen war es mittels des Verfahrens möglich, mit begrenztem Aufwand folgenden **Nutzen** zu erfahren:

- Es wurden auf Basis vorhandener Erfahrungen in einer strukturierten und transparenten Weise wesentliche Ursachen für Ressourcenverschwendungen (Schwachstellen) in den gewählten zwei Produkten aufgedeckt. Diese Potenziale können nun relativ einfach auch auf andere Produkte übertragen werden, da grundsätzliche Funktionsweisen ähnlich sind.
- Der bisherige Kenntnisstand über relevante emergente Technologien generell und insbesondere über jene mit Potenzial zur Einsparung von Ressourcen konnte aktualisiert und erweitert werden.
- Das bestehende Expertennetzwerk wurde ausgebaut. Die gemeinsame Bewertung einzelner Lösungsprinzipien initiierte bereits neue Forschungsk Kooperationen.
- Es wurden Ansatzpunkte für orientierende Tests und Laboranalysen für die potenziel-

le Anwendung einzelner Lösungsprinzipien erarbeitet.

6.2 Anwendung des Verfahrens bei einem Hersteller im Bereich Fahrzeugwäsche

6.2.1 Ausgangssituation im Unternehmen

Das Unternehmen Beta ist führender Anbieter für Lösungen auf dem Gebiet der Fahrzeugwäsche. Das Unternehmen ist weltweit präsent und die Produktpalette erstreckt sich von **Waschstraßensystemen über Selbstbedienungswaschanlagen** bis hin zu Wasseraufbereitungsanlagen.

Aufgrund einer zunehmend differenzierten Nachfrage seitens der Kunden hat sich der Weltmarktführer Beta das **mittel- und langfristige Ziel** gesetzt, die Ressourceneffizienz der angebotenen Produkte zu verbessern. Damit will das Unternehmen einen Beitrag zum schonenden Einsatz der zur Verfügung stehenden Ressourcen leisten und diesen auch aktiv bewerben. Insbesondere bezüglich des Energie- und Wasserverbrauchs der angebotenen Produkte will Beta zukünftig effizientere Lösungen anbieten, da bei einigen Kunden im Ausland unsichere Versorgungssituationen oder spezielle Einsatzsituationen vorliegen, die beispielsweise eine Energieautarkie der Anlagen interessant erscheinen lassen. Zudem wird eine diese Branche betreffende Verschärfung der internationalen Anforderungen an die Wasseraufbereitung bzw. Wasserrückgewinnung erwartet. Daraus ergab sich für Beta der Bedarf, neue technologische Entwicklungen mit Ressourceneffizienzpotenzial für ausgewählte Waschanlagen zu identifizieren.

6.2.2 Beschreibung der Anwendung

6.2.2.1 Umsetzung der Phase I: Definition der Zielstellungen

Zu Beginn des Projektes wurde ein Projektteam aus leitenden Vertretern der Forschung und Konstruktion zusammengestellt, das die Anwendung des Verfahrens im Unternehmen Beta begleitete und durchführte.

Als **Analysegegenstand** wurde auf Basis der Erfahrungen des Unternehmens eine Selbstbedienungswaschanlage (WA) ausgewählt. Bei dieser Anlage kann von einem ähnlichen Ressourceneffizienzpotenzial wie bei den komplexeren automatisierten Anlagen(systemen) ausgegangen werden. Gleichzeitig erlauben die überschaubare Anzahl an Komponenten, der prinzipielle Aufbau sowie die Funktionalität eine einfachere Analysierbarkeit. Darüber hinaus wird die WA in hohen Stückzahlen für den nationalen und internationalen Markt produziert.

Allgemeine **Zielstellungen** des Unternehmens waren die Ermittlung von Einsparpotenzialen im Produkt sowie die Erstellung einer bewerteten Übersicht zu Technologien, mit denen der Ressourcenverbrauch und die Lebenszykluskosten (speziell der Nutzungsphase) reduziert werden können. Im Einzelnen wurden folgende Ziele festgelegt:

- Ökonomische Unternehmens-Zielstellungen (Z_{01}): Die Wahrung der Positionierung als Marktführer
- Ressourcennutzungsbezogene Unternehmens-Zielstellungen (Z_{R1}): Die Positionierung in ausländischen Zielmärkten als umweltfreundliches Unternehmen mit gleichzeitig kostengünstigen Lösungen
- Technische Produkt-Zielstellungen (Z_{T2}): Die Unterstützung bei der Schaffung des technisch innovativsten Produktes im relevanten Marktsegment
- Ressourcennutzungsbezogene Produkt-Zielstellungen (Z_{R2}): Die Reduktion des Wasser-, Chemikalien- und Energieverbrauchs gegenüber Konkurrenzprodukten

- Ökonomische Produkt-Zielstellungen (Z_{O21}): Die kostengünstige Einhaltung von regulativen Anforderungen wie der Ablaufqualität des Abwassers
- Ökonomische Produkt-Zielstellungen (Z_{O22}): Der Investitionsaufwand für die gewählten Lösungsansätze sollte gering sein

6.2.2.2 Umsetzung der Phase II: Beschreibung ressourceneffizienzbezogener Probleme

Mit der Dekomposition wurde die WA auf Basis von Produktdatenblättern in Komponenten zerlegt und zugehörige Funktionen ermittelt (vgl. Tab. 26). Beispielsweise wurde das Funktionselement „Vorlagenbehälter“ u. a. mit der Funktion „Wasser vorhalten“ benannt. Es wurden nur die wesentlichen Funktionselemente aufgenommen, da bei manchen Komponenten wie der Wasserbatterie zur Regelung der Flüssigkeitskreisläufe von vornherein wenige technologische Alternativen bzw. lohnende Potenziale vermutet wurden. Andere, die aufgrund von Ähnlichkeit gemeinsam betrachtet werden können, wurden zusammengefasst (z. B. Hochdruck-Lanze, Schaumbürste und Powerschaumlanze).

Anschließend wurden mittels Ressourceneffizienz-Checkliste die **Schwachstellen** des Produktes während der Nutzung zusammengetragen und benannt (Tab. 26). Dabei wurden – wie in der Anwendung des Verfahrens beim Unternehmen Alpha – anfangs auch solche identifiziert, die nicht vordergründig ressourceneffizienzbezogen sind.¹⁴⁹ Diese Schwachstellen wurden nicht weiter betrachtet.

Tab. 26: Auswahl von Funktionselementen, Funktionen und Schwachstellen der Selbstbedienungs- waschanlage des Unternehmens Beta

Funktionselement (Kommentare)	Funktion (Kommentare)	Schwachstelle (Kommentare)
FE1: Vorlagenbehälter	F1: Wasser vorhalten und bereitstellen	SS1: hoher Verbrauch von Wasser im Vorlagenbehälter (Gefahr der Vermehrung von Legionellen beim Vorhalten des Wassers) ¹⁵⁰
FE2: Druckerhöhungspumpe, Hochdruckpumpe und Dosierpumpen mit Pulverdosisierung	<ul style="list-style-type: none"> • F2a: Flüssigkeit fördern • F2b: Kavitation verhindern bzw. Druck erhöhen • F2c: Medien mischen, Fließgut portionieren und mischen 	SS2: suboptimaler elektrischer Wirkungsgrad der Pumpen beim Fördern
FE3: Enthärtungsanlage	F3: Verkalkung verhindern	SS3: zusätzlicher Stromverbrauch durch die Enthärtungsanlage
FE4: Osmoseanlage (mit Aktivkohlefilter)	F4: rückstandsfreie Oberflächentrocknung ermöglichen (Wasserfleckenbildung vermeiden)	SS4: zusätzlicher Stromverbrauch durch Entsalzung des Wasser in der Osmoseanlage
FE5: Heizung	F5: Flüssigkeit erwärmen	SS5: enthärtetes Wasser wird bei suboptimalem elektrischem Wir-

¹⁴⁹ Beispiele sind „Toxizität bzw. Umweltgefährdung der Waschlösung“, „hohe Schallemission der Anlage“ und „ineffiziente Ausnutzung der Anlagenfläche“. Hierfür sind Lösungsprinzipien im Bereich des Stands der Technik bzw. emissionsmindernde Maßnahmen zu prüfen.

¹⁵⁰ Ein Problem bei dem Vorhalten von Wasser ist die Entstehung und Vermehrung von Legionellen. Aufgrund der feinen Zerstäubung von Wasser in der Waschanlage können die Legionellen vom Benutzer eingeatmet werden und die Legionärskrankheit hervorrufen.

Funktionselement (Kommentare)	Funktion (Kommentare)	Schwachstelle (Kommentare)
		kungsgrad erhitzt.
FE6: Heizlüfter	<ul style="list-style-type: none"> • F6a: Wärme abstrahlen • F6b: Vereisung verhindern 	SS6: energieineffiziente Erzeugung heißer Luft im Heizlüfter
FE7: Fußbodenheizung mit Frostschutzkreislaufsystem	F7: Personenunfälle vermeiden, Ausrutschen verhindern, Boden eisfrei halten, Vereisen verhindern	SS7: energieineffiziente Erzeugung heißer Luft in der Fußbodenheizung
FE8: Steuerung	F8: Stoff- / Energie- und Informationsübertragung beeinflussen	SS8: energieineffiziente Beheizung der zu heizenden Bereiche (keine bedarfsgerechte Steuerung der Heizungen möglich)
FE9: Hochdruck-Lanze, Schaumbürste und Powerschaumlanze	F9: Medien aufräumen, gezielt führen, Schmutz lösen bzw. abspülen	SS9: hoher Verbrauch an Medien (Effizienz des Auftragens etc.)
FE10: Außenwand (inkl. Verkleidung der Technikeinheit Garage)	<ul style="list-style-type: none"> • F10a: Belastungen aufnehmen, Schutz vor Witterung, Schmutz fern halten • F10b: Fixierung / Ordnung der Komponenten • F10c: Aufmerksamkeit hervorrufen 	SS10: energieineffiziente Dämmung der Außenwand
FE11: Überdachung mit Beleuchtung	F11: Betriebsfähigkeit sicherstellen (vor Frost schützen, Schmutz fernhalten, Aufmerksamkeit hervorrufen, Platz beleuchten)	SS11: energieineffiziente Beleuchtung in der Überdachung

Die **Schwachstellenbeschreibung** wurde aufgrund der Überschaubarkeit der Zusammenhänge nicht extra dokumentiert. Die RE-Parameter, Lösungs-Zielstellungen und Nutzenpotenziale wurden jedoch bestimmt (vgl. Tab. 27 des nächsten Kap.).

Anschließend wurden mit diesen Informationen für alle Schwachstellen die **PReF** zur Definition der abstrakten Probleme ermittelt, vgl. ebenfalls Tab. 27 des nächsten Kap..

6.2.2.3 Umsetzung der Phase III: Suche ressourceneffizienzsteigernder Lösungen

In der Umsetzung der Phase III galt es, die **abstrakten Lösungen** als RE-Grundprinzipien und die dazu gehörigen RE-Standardlösungen zu bestimmen. Die **Bewertung der prinzipiellen Eignung** ergab die Auswahl relevanter RE-Standardlösungen, die zusammen mit den definierten TReF in Tab. 27 dokumentiert sind.

Ohne die Involvierung von externen Experten wurden nun anhand der Schlagworte aus den formulierten TReF bereits erste **Lösungsprinzipien** mittels einschlägiger Quellen wie einer aktuellen Technologiestudie identifiziert. Hierauf folgend wurde eine erste Expertenliste mit rund zehn Experten aus den Schwerpunktbereichen Reinigungschemie und Wasseraufbereitung erstellt. Die Experten entstammten drei Fraunhofer-Instituten. Zunächst wurden ca. fünf telefonische Kurzinterviews geführt, um die Richtigkeit der Rechercheergebnisse zu überprüfen und die grundsätzliche Bereitschaft einer möglichen Zusammenarbeit abzufragen. Bei den Experten handelte es sich um wissenschaftliche Mitarbeiter.

Als Ergebnis der geführten Interviews wurde eine **Liste** mit Kurzbeschreibungen der identifizierten acht Lösungsprinzipien (vgl. Tab. 27) erstellt, Steckbriefe wurden nicht ausgefüllt.

Tab. 27: Produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF), Technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (TReF) und identifizierte Lösungsprinzipien des Unternehmens Beta

Nr.	PReF		Funktionen	TReF		Identifizierte Lösungsprinzipien
	Schwachstellen (Kurzform)	Funktions-elemente		RE-Parameter	RE-Standardlösungen (für unterstrichene wurden Lösungsprinzipien gefunden)	
1	SS1: wasserneffiziente und unhygienische Wasserbereitstellung	FE1: Vorklärbehälter	PMPS F1: sauberes Wasser bereitstellen	Optimierung der Kreislauf-fähigkeit (GP4)	<ul style="list-style-type: none"> Systemabschluss Flexibilisierung <u>Alternative Wirkprinzipien</u> 	<ul style="list-style-type: none"> biozide Beschichtungen (zur Vermeidung des Bewuchses mit Mikroorganismen) (L1) nanoporöse Membran zur Wasseraufbereitung (L2)
3	SS3: energieeffiziente Enthärtung	FE3: Enthärtungsanlage	PEPS F3: Verkalkung verhindern	Optimierung der Kreislauf-fähigkeit (GP4)	<ul style="list-style-type: none"> Miniaturisierung Multifunktionalität Bionik <u>Flexibilisierung</u> <u>Oberflächenfunktionalisierung</u> 	<ul style="list-style-type: none"> Umkehrosmose zur Enthärtung (L3) Trocknungstechnologie (Mikrowellen-, Ultraviolett-, Infrarotstrahlung) (L4)
4	SS4: energieeffiziente Entsalzung	FE4: Osmoseanlage (mit Aktivkohlefilter)	PEPS F4: rückstandsfrei trocknen	Optimierung der Kreislauf-fähigkeit (GP4)	<ul style="list-style-type: none"> Flexibilisierung Steuerung <u>Alternative Wirkprinzipien</u> 	<ul style="list-style-type: none"> Umkehrosmose zur Entsalzung (L5) Cyclodextrin (statt Aktivkohle) (L6)
5	SS5: energieeffiziente Erwärmung	FE5: Heizung	PEPS F5: Flüssigkeit erwärmen	Optimierung der Kreislauf-fähigkeit (GP4)	<ul style="list-style-type: none"> Systemabschluss Miniaturisierung Multifunktionalität 	<ul style="list-style-type: none"> enzymatische Biokatalysatoren (erhöhte Reinigungswirkung bei geringerer Temperatur)

Nr.	PRef		Funktionen	TRef		Identifizierte Lösungsprinzipien
	Schwachstellen (Kurzform)	Funktions-elemente		RE-Parameter	RE-Grundprinzipien	
6	SS6: Energieineffiziente Heißluft erzeugung	FE6: Heizlüfter	PEPS	F6: Wärme abstrahlen	Optimierung der Kreislauf-fähigkeit (GP4)	<p>RE-Standardlösungen (für unterstrichene wurden Lösungsprinzipien gefunden)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bionik • Flexibilisierung • Instandhaltung • Ökomaterialien • Maßschneidung • Oberflächenfunktionalisierung • Alternative Wirkprinzipien <p>Kosten: höher</p> <p>Leistung: gleich</p> <p>Ressourceneffizienz: höher</p> <p>Kosten: gleich</p>
7	SS7: energieeffiziente Heißluft-erzeugung	FE7: Fußbodenheizung mit Frostschutzkreislaufsystem	PEPS	F7: Betriebsfähigkeit sicherstellen (z. B. Vereisen verhindern)	Optimierung der Kreislauf-fähigkeit (GP4)	<ul style="list-style-type: none"> • Ökomaterialien • Maßschneidung • Oberflächenfunktionalisierung <p>Leistung: zusätzliche</p> <p>Ressourceneffizienz: höher</p> <p>Kosten: gleich</p>
8	SS8: energieeffiziente Anlagensteuerung	FE8: Steuerung	PEP	F8: Stoff-/Energie- und Informationsübertragung optimieren	Verlängerung der Lebensdauer (GP2)	<ul style="list-style-type: none"> • Ökomaterialien • Maßschneidung • Oberflächenfunktionalisierung • <u>Alternative Wirkprinzipien</u> <p>Leistung: gleich</p> <p>Ressourceneffizienz: höher</p> <p>Kosten: höher</p> <p>„Hyperspectral Imaging“ (Optimierung der Steuerung) (L6)</p>
11	SS11: energieeffiziente Anlagensteuerung	FE11: Verkantung der Technik-einheit Garage Überdachung Beleuchtung	PEP	F11: Betriebsfähigkeit sicherstellen	Verlängerung der Lebensdauer (GP2), Substitution von Ressourcen (GP1)	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilisierung • Oberflächenfunktionalisierung • Steuerung • Instandhaltung • Alternative Wirkprinzipien <p>Leistung: gleich</p> <p>Ressourceneffizienz: höher</p> <p>Kosten: höher</p>

6.2.2.4 Umsetzung der Phase IV: Ganzheitliche Bewertung der Lösungen

Bei der **Funktionalitätsbewertung** konnte die Funktionserfüllung dieser Lösungsprinzipien überprüft werden. So wurde das Lösungsprinzip „Trocknungstechnologie“ ausgeschlossen, da der erwünschte Trocknungseffekt nicht unter den in der Anlage vorherrschenden Bedingungen greift. Anschließend wurde für die prinzipiell geeigneten Lösungsprinzipien ein Wert für die Priorität und die Leistung bestimmt (vgl. Tab. 28). Dies ergab, dass die Lösungsprinzipien „biozide Beschichtungen“ (L1), „nanoporöse Membran zur Wasseraufbereitung“ (L2), und „enzymatische Biokatalysatoren“ (L7) hinsichtlich der Funktionalität allen Anforderungen der PREf mit der höchsten Priorität entsprachen.

In der folgenden **Ressourceneffizienzbewertung** wurden diese drei Lösungsprinzipien hinsichtlich des **Ressourcenverbrauchs** mittels MIPS bewertet. Beispielsweise versprach das Lösungsprinzip „nanoporöse Membran zur Wasseraufbereitung“ (L2) für die Erfüllung der Funktion „sauberes Wasser bereitstellen“ im Funktionselement „Vorlagebehälter“ ein besonderes Ressourceneffizienzpotenzial, da hierdurch die Schließung des Prozesswasserkreislaufs erreicht werden könnte. Das existierende Referenzlösungsprinzip, das dieselbe Funktion in der Anlage erfüllt, ist die Lösung der „Frischwasserzufuhr“, also ein nicht geschlossenes System. In diesem Fall lag eine erschwerte Vergleichbarkeit vor, da die Aufbereitung über das öffentliche Abwasserreinigungssystem nur ungenau berücksichtigt werden konnte. Die MIPS-Werte aller drei Lösungsprinzipien finden sich in Tab. 28.

Die Bewertungen wurden insbesondere mittels der Befragung der eingebundenen Experten sowie relevanten **Quellen** in Form von Datenblättern und Veröffentlichungen ermöglicht. Dies betraf speziell die von den Lösungsprinzipien benötigten Daten etwa zur potenziellen Reinigungsleistung und den eingesetzten Materialien. Weiterhin galt es seitens Beta die bekannten Daten zu den Referenzlösungsprinzipien und den Einsatzbedingungen der Waschanlage wie anfallende Abwassermengen, zur Verfügung zu stellen. Die benötigten MIT-Werte wurden über die frei zugänglichen Listen ermittelt (vgl. Kap. 3.2.3.2.2). Die bei den Berechnungen getroffenen wesentlichen Annahmen sind in Tab. 28 dargestellt.

Der **künftige Ressourcenbedarf** der ausgewählten Lösungsprinzipien wurde nicht bewertet, da die in Kap. 5.4.2.2 genannten Impulse laut Beta nicht zutrafen. Bei keiner der betrachteten Ressourcen wurde von einer eingeschränkten Verfügbarkeit, besonders hohen Kosten oder einem hohen Verbrauch im Laufe des Lebenszyklus ausgegangen.

Im letzten Schritt der Phase der **Kostenbewertung** wurden mittels Kapitalwertmethode die entstehenden Lebenszykluskosten der drei Lösungsprinzipien mittels der Formel 6 im Kap. 5.4.2.3 berechnet (vgl. Tab. 28).

In der folgenden Tab. sind die in der Phase IV ermittelten zentralen **Ergebnisse** als die *repräsentativen Kennzahlen* aufgeführt.

Tab. 28: Übersicht der repräsentativen Kennzahlen der Bewertung aller Lösungsprinzipien des Unternehmens Beta (Lebensdauer der Anlage beträgt zehn Jahre)

Lösungsprinzip	Funktion		Annahmen	
	Kennzahl	1		7
Referenzlösung	Leistungswert	170 l/h	0,414 m³/h	Heizung: Auslaufwassermenge: 6,9 l/min
	Ressourceneffizienzwert	10,0 g/(l/h)	860,0 g/(m³/h)	Heizung: Wärmeleistung: 24 kW; Leistungsaufnahme: 130 W
	Kostenwert (Kapitalwert)	45960 €	7060€	Wasserkosten: 1,7 €/m³; Abwasserkosten: 1,88 €/m³; Kosten Heizung: 6000 €
biozide Beschichtungen (L1)	Leistungswert	170 l/h		
	Ressourceneffizienzwert	5,5 g/(l/h)		Beschichtung: 40 % Silber, 40 % Kupfer, 20 % Zink; Beschichtungsdicke: 1 mm; Beschichtungsfläche: 2,68 m²; Benötigte Beschichtungsmenge: 2,5 kg
	Kostenwert	24480 €		Kosten Beschichtungspulver: 1000 €
Membran zur Wasseraufbereitung (L2)	Leistungswert	334 l/h		
	Ressourceneffizienzwert	8,1 g/(l/h)		Zusätzliche Pumpe: Leistung: 0,7 kW; Wasserrückspeisung: 250 l/h
	Kostenwert	40400 €		Kosten Membran-Anlage: 11000 €
Biokatalysatoren (L7)	Leistungswert		0,414 m³/h	Auslaufwassermenge: 6,9 l/min
	Ressourceneffizienzwert		599,9 g/(m³/h)	Heizung: Wärmeleistung: 18 kW; Leistungsaufnahme: 90 W
	Kostenwert		5730 €	Kosten Heizung: 5000 €

6.2.2.5 Umsetzung der Phase V: Planung der Maßnahmen

Entlang der getroffenen Bewertungen wurde nun der **Nutzen** der einzelnen Lösungsprinzipien ermittelt. Die Informationen wurden aus den erarbeiteten Zielstellungen in Kap. 6.2.2.1, sowie den funktionalitäts-, ressourceneffizienz- und kostenbezogenen Bewertungen zusammengetragen und entsprechend Tab. 18 in Kap. 5.5.2.1 in Ergebnisse bzgl. der Nutzenfaktoren überführt. Abb. 33 zeigt das daraus erstellte Netzdiagramm.

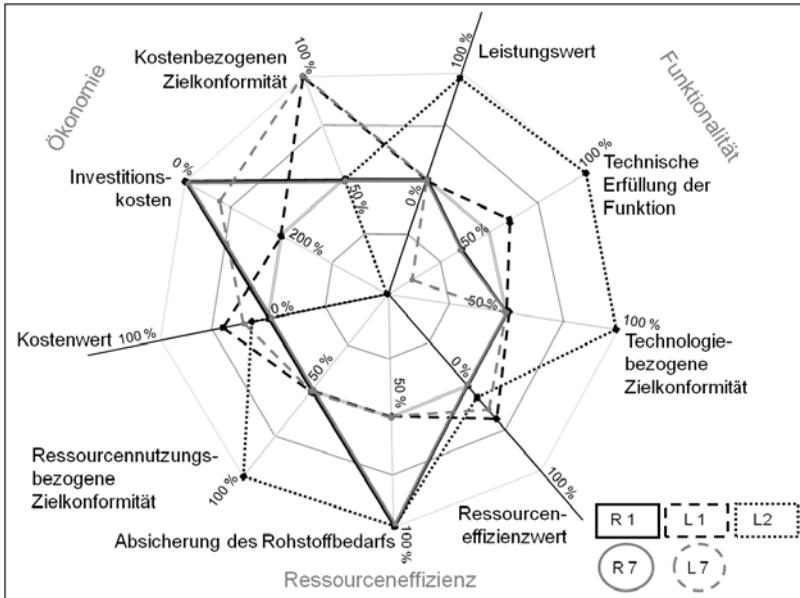


Abb. 33: Darstellung des ganzheitlichen Nutzens von Lösungsprinzipien im Unternehmen Beta

Auf Basis der Portfoliobetrachtung (vgl. Abb. 34) und der geführten Diskussionen wurde nun das weitere Vorgehen erörtert.

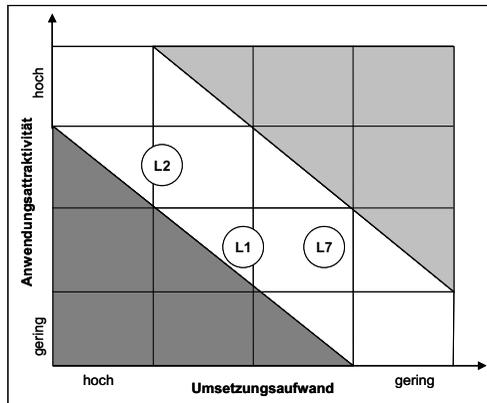


Abb. 34: Portfolio zur Auswahl der Lösungsprinzipien im Unternehmen Beta

Für die Lösungsprinzipien galt es entsprechend der jeweiligen Anwendungsreife weitere **Maßnahmen** für Tests und Analysen mit den entsprechenden Experten zu vereinbaren. Für das Lösungsprinzip „Membran zur Wasseraufbereitung“ (L4) wurden seitens Beta erste Untersuchungen in speziellen Versuchsaufbauten durchgeführt.

6.2.3 Nutzen der Anwendung für das Unternehmen Beta

Durch die Anwendung des Verfahrens beim Unternehmen Beta konnten ausgehend von elf erarbeiteten ressourcenverbrauchsbezogenen Schwachstellen des Produkts acht mögliche neue Lösungsprinzipien mit Ressourceneffizienzpotenzial identifiziert werden. Von denen wurden die drei **interessantesten Lösungsprinzipien** ausgewählt und ganzheitlich bewertet. Definierte konkrete Maßnahmen sollen diese schließlich in einer nächsten Produktgeneration implementieren helfen.

Dem Unternehmen war es mittels des Verfahrens möglich, mit begrenztem Aufwand folgenden **Nutzen** zu erfahren:

- Es wurden auf Basis von internen Erfahrungen vielversprechende Ansätze für vorhandene Ressourceneffizienzpotenziale in dem gewählten Produkt aufgedeckt. Diese können gut auf weite Bereiche des Produktspektrums übertragen werden, da grundsätzliche Bau- und Funktionsweisen ähnlich sind.
- Der bisherige Kenntnisstand über neue relevante Technologien generell und insbesondere über jene mit Potenzial zur Einsparung von Ressourcen konnte aktualisiert und erweitert werden.
- Es liegen nun Ansatzpunkte für die ressourceneffizienzorientierte Differenzierung der bestehenden Produkte vor, die eine bessere Ausrichtung auf entsprechende Kundenbedürfnisse erlauben.
- Es wurden erste Ideen für orientierende Tests und Laboranalysen für die potenzielle Anwendung einzelner Lösungsprinzipien erarbeitet.

6.3 Zusammenfassung der Umsetzung

Die praktische Anwendung hat gezeigt, dass auf Grundlage des Verfahrens beim Unternehmen Alpha und beim Unternehmen Beta für die gewählten Produkte **alternative ressourceneffizienzsteigernde Lösungsprinzipien aus dem Feld der emergenten Technologien** identifiziert und ganzheitlich bewertet werden konnten.

In beiden Unternehmen wurden basierend auf vorhandenen Erfahrungen zielgerichtet nutzungsphasenbezogene Schwachstellen mit Ressourceneinsparungspotenzial aufgedeckt und in je acht PReF überführt. Hierdurch gelang in beiden Fällen eine umfassende und vollständige Beschreibung der gegenwärtigen relevanten Problemlagen. Für die definierten PReF konnten mittels der Modellelemente letztendlich eine Reihe passender TReF ermittelt werden. Eine Involvierung von ausgewählten Experten und weiteren Quellen ermöglichte im Fall vom Unternehmen Alpha die Erarbeitung von zehn vielversprechenden Lösungsprinzipien. Im Unternehmen Beta ergaben sich mit geringer Unterstützung externer Experten und verstärkter Suche in Literaturquellen acht aussichtsreiche Lösungsprinzipien. Von diesen Lösungsprinzipien konnten in beiden Fällen die technisch nicht passenden herausgefiltert werden, so dass mit den übrigen fünf bzw. drei die Ressourceneffizienzbewertung und Kostenbewertung vollzogen werden konnte. Hier erwiesen sich die unterschiedlichen Vorstellungen der Unternehmen hinsichtlich des zu investierenden zeitlichen und personellen Aufwands als im Verfahren umsetzbar. Die favorisierten alternativen Lösungsprinzipien zeigten einen differenzierbaren ganzheitlichen Nutzen, der auch die Erarbeitung von spezifischen Maßnahmen erlaubte.

In beiden Fällen scheint es wahrscheinlich, dass die Umsetzung der ausgewählten Lösungsprinzipien einen Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz der Produkte leisteten kann und die resultierende Nutzenoptimierung den Unternehmen ein **Marktvorteil** verschaffen wird.

7 Evaluation und Diskussion

7.1 Evaluation

Die praktische Anwendung in zwei produzierenden Unternehmen hat gezeigt, dass das Verfahren für die ressourceneffizienzorientierte Produktweiterentwicklung unter Einsatz emergenter Technologien geeignet ist. Für die kritische Würdigung müssen die in Kap. 4.3 formulierten **Anforderungen** überprüft werden. Im Folgenden werden deshalb die gewonnenen Erfahrungen aus der Anwendung anhand der einzelnen Anforderungen dargestellt.

Übergreifende Anforderungen

Die **Anwendbarkeit** des Verfahrens konnte demonstriert werden, da den unterschiedlichen Ausgangsvoraussetzungen, Zielstellungen und Erwartungen in beiden Fällen insgesamt entsprochen werden konnte. Es zeigte sich, dass der Aufwand zur Durchführung des Verfahrens durch den erzielten Nutzen gerechtfertigt ist und der Mehrwert in beiden Anwendungsfällen klar erkennbar war. Von einer **Benutzerfreundlichkeit** des Verfahrens kann ebenfalls ausgegangen werden, da die zu erledigenden Arbeitsaufgaben in den Verfahrensschritten zu jeder Zeit von den Beteiligten durchführbar waren. Hierbei erwiesen sich die Nutzung von in der Praxis bekannten und eingesetzten Terminologien und Methoden wie Checklisten oder Portfoliotechnik als geeignet. Beigetragen hat zudem, dass nach jedem Schritt ein Erkenntnisgewinn in Form eines konkreten Ergebnisses erzielt wird und am Ende des Verfahrens eine übersichtliche Visualisierung der Ergebnisse etwa in dem Netzdiagramm darstellbar ist.

Auch die erforderliche **Flexibilität** des Verfahrens ist gewährleistet, da die Möglichkeit, einzelne Schritte auf das Unternehmen anzupassen, verkürzt auszuführen bzw. zu überspringen gezeigt werden konnte. So unterschied sich der Anwendungsfall des Unternehmens Beta im Vergleich zum Unternehmen Alpha u. a. durch den geringeren Aufwand in der Durchführung. Dies führte jedoch zu keinen größeren Einbußen in der Qualität der Ergebnisse, weil wesentliche Schritte wie die Lösungssuche flexibel durchführbar sind. Darüber hinaus können einzelne Schritte modular eingesetzt und erweitert werden, da das Verfahren als offener Ansatz ausgelegt ist. Beispielsweise erlauben die gewählten Methoden der Ressourceneffizienzbewertung und der Kostenbewertung eine auf den spezifischen Bedarf abgestimmte Betrachtung, die mehr oder weniger detailliert sein kann. Weiterhin können die Modellelemente des Technologiepotenzialmodells als zentrale Parameter des Verfahrens durch die Anwender ergänzt und auf neue Anforderungen adaptiert werden.

Insgesamt ist allerdings aufgrund der Komplexität des Themas – speziell wegen der geforderten ganzheitlichen Bewertung mit der Wahrung des Lebenszyklusgedankens – ein relativ hoher Aufwand etwa zur Datengenerierung unvermeidbar und daher auch bei diesem Verfahren vorhanden.

Problemstellungsbezogene Anforderungen

Bezüglich der problemstellungsbezogenen Anforderungen zeigte die Umsetzung des Verfahrens, dass Unternehmen befähigt werden, **ressourcenverbrauchsbezogene Schwachstellen** eines ausgewählten Produktes in der Nutzungsphase systematisch zu identifizieren und zu analysieren. Bei dieser Problemdiagnose unterstützt das Verfahren die effektive Nutzung vorhandenen Wissens und wertvoller Erfahrungen im Unternehmen. In Form der produktbezogenen Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF) ist eine handhabbare, aggregierte Beschreibung der spezifischen Problemstellung möglich, die eine Vorfizierung von Lösungen vermeidet.

Auf Grundlage der hierzu komplementären Technologiebezogenen Ressourceneffizienz-Funktionen (TReF) als „gerichtete“ Lösungsbeschreibungen können anschließend **alternative Lösungsprinzipien** emergenter Technologien mit Ressourceneffizienzpotenzial aufwandsreduziert ermittelt werden. Dabei bewiesen die im Technologiepotenzialmodell erarbeiteten Modellelemente ihre Tauglichkeit, indem sie den Suchprozess nach alternativen

Lösungsprinzipien „schlank“ hielten. Zudem erwiesen sich die RE-Grundprinzipien und RE-Standardlösungen als inspirierende Faktoren bei der kreativen Ideensuche. Gezeigt wurde ebenso die Möglichkeit, völlig neue Lösungsprinzipien zu identifizieren, die auf ähnlichen Prinzipien beruhen, aber beispielsweise aus anderen Branchen stammen. So etwa beim Unternehmen Alpha im Fall des Lösungsprinzips „Aerogels“, das üblicherweise in der Baubranche eingesetzt wird. Das ressourceneffizienzbezogene Technologiepotenzialmodell stellt damit den für das Verfahren benötigten **systematischen Zugang zur Ressourceneffizienz** dar. Dieser besitzt weitestgehend unabhängig von technologischen Entwicklungen und Anwendungen Gültigkeit.

Weiterhin wurde in der Anwendung gezeigt, dass das Verfahren relevante Informationen zu technischen Anforderungen, Ressourceneffizienzpotenzialen und auch Kundenbedürfnissen zusammenführt. Mit der methodischen Analyse relevanter **technisch-funktionaler, ressourceneffizienzbezogener und auch ökonomischer Aspekte** kann die Ausprägung eines ganzheitlichen Nutzens und damit letztendlich die Marktkonformität der alternativen Lösungsprinzipien demonstriert werden. Dabei wird sowohl unternehmensinternes als auch unternehmensexternes Wissen eingebracht. Die Involvierung von Experten ermöglicht die Einbeziehung von außerhalb des bisherigen Wissensbereichs liegenden Wissens.

Das Verfahren erweist sich als **anschlussfähig**, da die erarbeiteten Ergebnisse über Maßnahmen wie die Durchführung erster vertiefender Labortests zur Anwendbarkeit der Lösungsprinzipien in die gängigen Unternehmensprozesse eingefügt werden konnten. Die Überführung in bestehende Formate konnte im Fall des Unternehmens Alpha gezeigt werden, indem etwa die potenziell erzielbare Energieeinsparung (wie bei Alpha üblich) in äquivalente CO₂-Einsparung ausgedrückt werden konnte.

Eine zusammenfassende Darstellung der Anforderungen an das Verfahren mit dem relativen Grad der Erfüllung bei den Anwendern zeigt Tab. 29.

Tab. 29: Zusammenfassung der Anforderungen und ihr relativer Grad der Erfüllung bei den Anwendern

Anforderung an das Verfahren		Unternehmen Alpha	Unternehmen Beta
Anwendbarkeit		●	●
Benutzerfreundlichkeit		○	○
Flexibilität		●	●
Berücksichtigung ressourcenverbrauchsbezogener Schwachstellen in der Nutzungsphase des Produktes	Nutzung vorhandenen Wissens	●	●
	handhabbare Beschreibung der spezifischen Problemstellung	●	●
Berücksichtigung emergenter Technologien mit Ressourceneffizienzpotenzial	schlanker Suchprozess	●	●
	umfassende Identifikation branchenunabhängiger alternativer Lösungsprinzipien	●	○
Aufbau eines systematischen branchen- und anwendungsunabhängigen Zugangs zur Ressourceneffizienz		●	●
Analyse relevanter technisch-funktionaler, ressourceneffizienzbezogener und auch ökonomischer Aspekte		●	●
Anschlussfähigkeit	Übernahme der Ergebnisse in gängige Unternehmensprozesse	○	○
	Überführung in bestehende Formate	○	○

Legende: Anforderung vollständig erfüllt ● Anforderung teilweise erfüllt ○

7.2 Diskussion

Die Evaluation des Verfahrens lässt den Rückschluss zu, dass das Verfahren in der Praxis anwendbar ist und die Ergebnisse für die Anwender nützlich sind. Die Ziele der Arbeit sowie die formulierten Anforderungen an das Verfahren gelten damit als erfüllt. Im Folgenden werden einige für das Verfahren **besonders relevante Aspekte** diskutiert und kritisch überprüft.

Konzept Ressourceneffizienz

Die Forderung nach mehr Ressourceneffizienz in sämtlichen Handlungen zur Befriedigung menschlicher Bedürfnisse ist heutzutage fast schon breiter Konsens. Im Kontext der industriellen Produktion birgt das **Konzept der Ressourceneffizienz** allerdings mit der Charakteristik der Ganzheitlichkeit, Interdisziplinarität und branchenübergreifenden Gültigkeit auch ein großes Innovationspotenzial, das es vermehrt zu operationalisieren und anschließend zu nutzen gilt. Existierende Methoden, die meist aus dem Umfeld der Umweltwirkungsbewertung stammen, können mit ihrer Problemorientierung dies bisher nicht adäquat unterstützen. Das vorliegende Verfahren integriert daher chancenorientierte Methodenbausteine des Technologie- und Innovationsmanagements mit ausgewählten fundierten Elementen der Ressourceneffizienzbewertung und dient dazu, die ganzheitlichen Nutzenpotenziale ressourceneffizienter emergenter Technologien in dem definierten Anwendungskontext zu realisieren.

Die Bewertung der Ressourceneffizienz eines Betrachtungsgegenstandes (Technologie, Produkt, System oder Dienstleistung) ist grundsätzlich anspruchsvoll und mit hohem Aufwand verbunden (vgl. Kap. 3.2.2 und 3.3.2.2). Hier setzt speziell das in dieser Arbeit erstellte ressourceneffizienzbezogene Technologiepotenzialmodell im Zusammenspiel mit den gewählten Bewertungsmethoden (z. B. MIPS) an, indem eine **bedarfsgerechte Komplexitätsreduktion** herbeiführt wird, bei der es zu keiner Verfälschung der Ergebnisse kommt. Weiterhin erlaubt der Zuschnitt des Verfahrens etwa auf die zu adressierenden Produkte eine Fokussierung des Untersuchungsrahmens. Dies wird durch die Annahme begründet, dass die betrachteten Investitionsgüter den größten Ressourcenverbrauch in der Nutzungsphase haben. Daneben kann mit dem Zuschnitt auch die aufwändige Berücksichtigung sämtlicher umweltrelevanter Output-Kategorien wie Emissionen oder Toxizität vermieden werden. Weitere Indikatoren etwa zur Absicherung der ganzheitlichen Performanz bzw. Kommunizierbarkeit (z. B. Carbon Footprint) können jedoch bei Bedarf mit geringem Aufwand zusätzlich erhoben werden.

Je nach Fragestellung können darüber hinaus unterschiedliche **Bewertungsschwerpunkte** von Interesse sein. Im Rahmen der Ressourcenverbrauchsbewertung könnten daher alternativ zu MIPS auch andere Methoden der Kurzbilanzierung zur Ermittlung einer aggregierten Kennzahl wie die KEA-Analyse (vgl. Kap. 3.2.3.2.2) eingesetzt werden. MIPS stellt jedoch für eine speziell auf Ressourcenverbrauch ausgerichtete kosten- und zeiteffiziente Betrachtung – speziell in der weiterentwickelten und fokussierten Form dieser Arbeit – die praktikabelste Methode dar und die Ergebnisse können zudem gut kommuniziert werden (vgl. Atik 2001). Gilt es etwa, dem Anspruch einer aus Sicht der Umweltwirkungsbetrachtung umfassenden Bewertung Genüge zu tun, kann die Anwendung der Ökobilanzierung (vgl. Kap. 3.2.2 und 3.3.2.2) adäquat sein.

Die Abschätzung des künftigen Ressourcenbedarfs wird in diesem Verfahren in einer vereinfachten Weise durchgeführt, da hier aus Sicht des gedachten Anwendungsrahmens im Allgemeinen kein besonders hoher Bedarf gesehen wird. In speziellen Anwendungsfällen, wenn etwa seltene Rohstoffe eingesetzt werden, kann dies aber durchaus von vordergründigem Interesse sein. Ggf. können zu den bereits im Verfahren verwendeten auch zusätzliche Projektionen erarbeitet werden. Dabei gilt es, geeignete Indikatoren zu nutzen, deren statistische Daten Aufschluss über Trends geben (vgl. 3.1.2.1).

Generell besteht bei der Umsetzung des Konzeptes der Ressourceneffizienz jedoch nach wie vor **Forschungsbedarf**, insbesondere zu geeigneten Bewertungsstandards oder auch zur

besseren Passfähigkeit für die verschiedenen unternehmerischen Anwendungskontexte (Rohn et al. 2010).

Aufwand und Nutzen

Die Anwendung des Verfahrens in den Unternehmen hat gezeigt, dass insbesondere die **ganzheitliche Bewertung** der Lösungsprinzipien aufgrund der benötigten Datenqualität / -quantität in Verbindung mit entsprechenden Unsicherheiten aufwändig ist (vgl. Kap. 3.2.2). Die Generierung von nutzbaren Daten zu relevanten Lebenszyklusphasen erfordert etwa bei der Ressourceneffizienz- oder kostenbezogenen Betrachtung spezifisches Anwendungswissen, welches für emergente Technologien häufig nicht ausreichend vorhanden ist. In diesen Fällen muss die Informationsgewinnung über das Studium naheliegender Quellen auf zusätzliche, wie z. B. spezielle Forschungsinstitutionen oder branchenfremde Unternehmen ausgeweitet werden. Generell verringert sich der Aufwand mit der wiederholten Durchführung des Verfahrens, da vorhandene Erkenntnisse genutzt und angepasst werden können.

Außerdem erwies sich auch die abgestufte Vorgehensweise des Problemlösungsprozesses im Verfahren als aufwandsreduzierend. So zeichnet sich die entwickelte Schwachstellenanalyse beispielsweise durch die effiziente Problemidentifikation aus (Birkhofer 2000). Weiterhin grenzt etwa die Bewertung der prinzipiellen Eignung von RE-Standardlösungen frühzeitig den Betrachtungsraum ein und reduziert damit letztendlich die Anzahl der möglichen Lösungsprinzipien auf die relevantesten. Außerdem ist zu erwarten, dass Anwender bei zunehmender Vertrautheit mit dem Verfahren einzelne Schritte verkürzt bzw. schneller ausführen können, ohne dass die Ergebnisqualität abnimmt.

Vor dem Hintergrund eines optimalen Verhältnisses von Aufwand und Nutzen bleibt allerdings ein Konflikt zwischen der eingesetzten Zeit und der notwendigen bzw. gewünschten Ergebnisqualität bestehen. So lassen die bei dem Anwender Alpha erzielten Ergebnisse darauf schließen, dass sich eine ausführliche Durchführung des Verfahrens lohnt. Grundsätzlich muss deshalb fallweise geklärt werden, in welcher Form das Verfahren angewendet wird. Der **Aufbau des Verfahrens** lässt diese flexible Durchführung zu.

Anwendungsbreite

Das Verfahren wurde speziell für die Weiterentwicklung von komplexen Investitionsgütern des Maschinen- und Anlagenbaus entwickelt. **Andere Produktgruppen** aus sonstigen Branchen oder etwa Konsumgüter wurden nicht betrachtet. Es ist aber davon auszugehen, dass das Verfahren aufgrund seines allgemein üblichen Aufbaus und dem Einsatz von typischen Bestandteilen wie der Schwachstellenanalyse, dem Problemlösungsprozess und der funktionsbasierten Beschreibung prinzipiell auch breiter anwendbar ist (vgl. Kap. 4.1). Ggf. müssten aber bei in dieser Arbeit nicht berücksichtigten Produktgruppen die methodischen Schwerpunkte anders gelegt werden. So könnte der Einsatz der Szenario-Technik im Verfahren für bestimmte Produkte von hervorgehobener Bedeutung sein und daher den Fokus der Bewertung ausmachen – etwa im Falle bestimmter Elektronikprodukte, die besonders seltene oder teure Rohstoffe beinhalten und daher eine tiefgehende Analyse der Versorgungssicherheit mit Rohstoffen (vgl. Kap. 3.1.2.1) erfordern.

Aus einer prinzipiellen Anwendbarkeit der Hauptbestandteile in anderen Kontexten folgt allerdings noch keine gesicherte effektive Einsetzbarkeit des Verfahrens auch für andere Produkte. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die Verfahrensschritte auf den jeweiligen Analysegegenstand angepasst werden müssen. So müsste etwa die Fokussierung auf die Nutzungsphase kritisch überprüft werden, da einige Produkte (wie passive Produkte, vgl. Kap. 3.3.2.2) den bestimmenden Ressourcenverbrauch in anderen Lebenszyklusphasen wie der Herstellung haben. In solchen Fällen müssten Modellelemente ggf. angepasst und die Bilanzierungsgrenzen weiter gefasst werden, womit der Aufwand der Bewertung eventuell steigen würde.

Validität der Modellelemente und Funktionsbeschreibungen

Das entwickelte Verfahren setzt ebenso wie die TRIZ-Methodik Elemente zur Entwicklung produktspezifischer Lösungen (Modellelemente) ein. Dazu wurden insgesamt 18 RE-Parameter, fünf RE-Grundprinzipien und 14 RE-Standardlösungen auf der Grundlage einer Analyse ressourceneffizienzbezogener Optimierungsansätze sowie technologischer Potenzialdarstellungen im Rahmen eines erstellten Technologiepotenzialmodells logisch-deduktiv entwickelt (vgl. Kap. 4.1). Da die in der Literatur vorhandenen Prinzipien (etwa von ALTSCHULLER, vgl. Altschuller 1973) einen ressourceneffizienzbezogenen Problemlösungsprozess nicht ausreichend unterstützen, mussten für die Anforderungen des Verfahrens **eigene Lösungsmuster** entwickelt werden. Als Quellen wurden in erster Linie wissenschaftliche Originalliteratur, Monographien sowie eigene Erfahrungen in Forschungs- und Beratungsprojekten verwendet. Weiterhin wurden Analogien eingeführt, die Modellelemente mit einem ähnlichen Anwendungsfokus verknüpfen und auf diese Weise Lösungsoptionen aufzeigen. Im Ergebnis wurde eine Neuentwicklung von Modellelementen geleistet für den Zweck der Unterstützung des ressourceneffizienzorientierten Problemlösungsprozesses im Rahmen der Weiterentwicklung eines Produktes. Für eine branchen- oder produktübergreifende Anwendung müssten die Modellelemente auf ihre Tauglichkeit hin überprüft und ggf. ergänzt werden.

Die entwickelten Modellelemente erheben insgesamt keinen Anspruch auf eine vollständige Darstellung aller bekannten und erfolgreichen Muster zur Adressierung von ressourcenverbrauchsbezogenen Schwachstellen in der Nutzungsphase. Die Anwendung in den beiden Unternehmen sowie die teilweise große Übereinstimmung mit bekannten Ansätzen in der Fachliteratur weist jedoch auf deren praktische Relevanz und Anwendbarkeit hin.

Zur übersichtlichen und gleichzeitig umfassenden **Problem- und Lösungsbeschreibung** im Sinne der Aufgabenstellung wurden auf Basis der Modellelemente produktbezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (PReF) und technologiebezogene Ressourceneffizienz-Funktionen (TReF) eingeführt. Die PReF und TReF vermitteln über Abstraktion zwischen den beiden Perspektiven Produkt und Technologie als Ziel-Mittel-Kombinationen, wobei die Funktion als Bindeglied fungiert (vgl. Kap. 3.3.1). Sie vermögen es damit, Ressourcenverbrauchspotenziale im Produkt in Ressourceneffizienzpotenziale einer Technologie zu übersetzen und umgekehrt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung unter Einsatz emergenter Technologien in der Nutzungsphase. Dabei werden vier Teilziele verfolgt:

- Das Verfahren soll nutzungsphasenbezogene Ressourcenverbrauchspotenziale eines Produktes systematisch identifizieren und analysieren.
- Für diese sind auf Basis formalisierter ressourceneffizienzbezogener Optimierungsansätze und technologischer Potenzialdarstellungen alternative ressourceneffizienzsteigernde Lösungsprinzipien emergenter Technologien zu ermitteln.
- Eine ganzheitliche Bewertung soll anschließend den technisch-funktionalen, ökonomischen und ressourceneffizienzbezogenen Nutzen eines Lösungsprinzips in der Anwendung ermitteln.
- Das Verfahren muss im Rahmen einer Produktweiterentwicklung anwendbar sein und hinsichtlich relevanter Aufgabenstellungen des Technologie- und Innovationsmanagements unterstützen.

Ressourceneffizienz wird in dieser Arbeit als marktkonforme Schlüsselstrategie zur Erfüllung von Erfordernissen aus Nachhaltigkeit, Umwelt- und Klimaschutz verstanden. Dabei definiert sie auch Anforderungen an die Nutzung von Energie, Material und Wasser in einem Produkt, welches in dieser Untersuchung als ein komplexes Investitionsgut des Maschinen- und Anlagenbaus verstanden wird. Ziel ist die Vergrößerung des nutzenbringenden Outputs je Ressourceninput durch die Anwendung geeigneter emergenter Technologien. Hieraus sollte ein Mehrwert entstehen, der sich in verbesserten Produkteigenschaften bzw. einer höheren Qualität äußert und zu einem erhöhten Kundennutzen oder im Idealfall einer Eco-Innovation führt.

Folglich müssen Unternehmen systematisch an das Konzept der Ressourceneffizienz herangeführt werden, um beispielsweise auch emergente Technologien zur Realisierung von Ressourceneinsparung einsetzen zu können. Denn die **unternehmerische Praxis** offenbart, dass geeignete Methoden fehlen, die auf Basis vorhandener Schwachstellen eines Produktes alternative technologische Lösungsprinzipien aus dem Bereich der emergenten Technologien mit Ressourceneffizienzpotenzial identifizieren und ganzheitlich¹⁵¹ bewerten helfen. Dies liegt vor allem an einer geringen Praxistauglichkeit vorhandener Ansätze der Umweltwirkungsbewertung, Technologiebewertung und Produktentwicklung.

Mit dem hier entwickelten Verfahren wird ein Ansatz der Produktweiterentwicklung vorgestellt, der Unternehmen bei der Integration von ressourceneffizienzsteigernden technologischen Lösungsprinzipien in ein Produkt unterstützt. So werden die vorhandenen ressourceneffizienzbezogenen Problemstellungen des Produktes in der Nutzungsphase mit einer Schwachstellenanalyse aufgenommen und beschrieben, um anschließend die Lösungssuche zur systematischen Entwicklung von technologischen Lösungsprinzipien durchzuführen. Die identifizierten alternativen technologischen Lösungsprinzipien sollen dabei ganzheitlichen Nutzenanforderungen genügen. Dies wird durch eine umfassende quantitative und qualitative Bewertung sichergestellt, die schließlich die Ableitung von Maßnahmen zur Umsetzung der favorisierten Lösungen einleitet.

Das Verfahren beruht auf einer funktionsbezogenen Beschreibung des Produktes, welche als Bindeglied zwischen Produkt und Technologie fungiert. Zudem kommt ein ressourceneffi-

¹⁵¹ Ganzheitlich meint hier die integrierte lebenszyklusbezogene Berücksichtigung technisch-funktionaler, ressourceneffizienzbezogener und ökonomischer Anforderungen.

zizienzbezogenes Technologiepotenzialmodell zum Tragen, welches die in dieser Arbeit betrachtete Technologiedomäne aus emergenten Technologien mit Ressourceneffizienzpotenzial operationalisiert. Schließlich werden existierende methodische Ansätze wie TRIZ, Schwachstellenanalyse, House of Technology und Szenario-Technik in angepasster Form angewendet. Insgesamt wird so ein Zugang zum Konzept der Ressourceneffizienz geschaffen.

Auf diese Weise **liefert das Verfahren** dem Unternehmen wesentliche Ansatzpunkte für neue Ziel-Mittel-Kombinationen, welche sowohl inkrementell als auch radikal sein können. Der Anwendungskontext kann dabei substituierend, komplementär oder neu zu den bisherigen Lösungen sein. Diese alternativen ressourceneffizienzsteigernden Lösungen eröffnen dem Unternehmen die Möglichkeit, den genannten Mehrwert im Produkt umzusetzen und damit einen Wettbewerbsvorteil zu schaffen.

Die Eignung des Verfahrens wurde am Beispiel des Bedarfs von Unternehmen der Verpackungstechnik und der Fahrzeugwäsche dargestellt. So erhielten sowohl ein Hersteller von Verpackungsmaschinen als auch ein Hersteller von Autowaschanlagen einen aufwandsarmen und anwendungsspezifischen Zugang zur Ressourceneffizienz. Hierbei wurden vorhandene Ressourceneffizienzpotenziale möglichen alternativen ressourceneffizienzsteigernden Lösungsprinzipien emergenter Technologien gegenübergestellt. Dies geschah ausgehend von einer Vielzahl von identifizierten Schwachstellen und anhand von typischen Lösungsmustern. Für die Recherche- und Bewertungsphasen wurde neben explizitem auch speziell implizites Wissen von Experten genutzt. Abschließend wurden der ganzheitliche Nutzen der Lösungsprinzipien bewertet und Maßnahmen zur weiteren Verfolgung der Ideen abgeleitet. Die angewendeten Analyse- und Bewertungsmethoden ermöglichten ein transparentes Vorgehen und konnten dem jeweiligen unternehmensspezifischen Bedarf angepasst werden.

Für die Unternehmen bestand der **Nutzen** des Verfahrens darin, dass:

- sie erstmalig einen systematischen Zugang zur Ressourceneffizienz erhalten haben, mit dem sie nunmehr neue ressourceneffizienzsteigernde Lösungsmöglichkeiten selbständig methodisch erarbeiten können.
- neue Lösungsalternativen für Produktfunktionen identifiziert wurden, die eine Ressourceneffizienzsteigerung und damit ganzheitliche Nutzenoptimierung im Produkt implizieren. Damit konnte die Wettbewerbsfähigkeit gesteigert werden.
- die Auswahl und Umsetzung der ressourceneffizienzbezogenen Innovationspotenziale systematisch unterstützt wurden. Damit konnte eine verbesserte – auf aussagekräftigen Informationen beruhende – Entscheidungsgrundlage geschaffen werden.
- das Netzwerk des Unternehmens um den Kompetenzbereich Ressourceneffizienz ergänzt wurde und neue Kooperationspartner für die vorgelagerten Stufen der Wertschöpfungskette hinzugewonnen werden konnten.

8.2 Ausblick

Vor dem Hintergrund der sich **global verändernden Rahmenbedingungen** zeichnet sich immer mehr ein Bewusstseinswandel ab: Unternehmen agieren nicht mehr ausschließlich profitorientiert, sondern stellen sich zunehmend ihrer ganzheitlichen gesellschaftlichen Verantwortung. Dies erfordert vor allem auch den effizienten Umgang mit Ressourcen. Ob die weltweite Wirtschaft tatsächlich – wie von einigen Experten dargestellt – vor einer „Effizienzrevolution“ mit der Tragweite der Industriellen Revolution steht, wird die Zukunft zeigen. Bereits jetzt ist festzustellen, dass die verstärkte Nachfrage hinsichtlich nachhaltigen, umweltfreundlichen und ressourceneffizienten Lösungen sowie die öffentliche Förderung eines daran ausgerichteten Technologieangebotes (Technologie-Push) zu einem steigenden Druck speziell auf die produzierenden Unternehmen des rohstoffarmen Wirtschaftsstandorts Deutschland führen. Über direkt umsetzbare Maßnahmen (z. B. Stand der Technik) hinaus gilt es insbesondere, ressourceneffizienzsteigernde emergente Technologien zu adaptieren. Vor diesem Hintergrund müssen – z. B. mittels geeigneter Bewertungs- und Kommunikati-

onsstrategien – verstärkt vorhandene Potenziale emergenter Technologien zugänglich gemacht und anschließend geeignete Maßnahmen zur anwendungsbezogenen Umsetzung erarbeitet werden.

Im Zusammenhang mit der **Technologieadaption** besteht allerdings die Schwierigkeit, relevante Informationen zu generieren und einschlägige Experten zu identifizieren. Daher wird seit einiger Zeit in entsprechenden Fachdisziplinen der Expertenidentifikation und der Netzwerkbildung erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt, Ansätze wie Innovation Community oder Open Innovation zeigen dies (Bullinger, Warschat 2007). Auch speziell im Bereich der Ressourceneffizienz haben sich bereits einige Institutionen und Netzwerke wie das „Netzwerk Ressourceneffizienz“ formiert, um über Chancen und Risiken zu informieren und als Ansprechpartner zu fungieren. Das vorhandene Wissen gilt es verstärkt in die relevanten Bereiche zu verbreiten.

Die **Praxis der Produktentwicklung** zeigt, dass die Ressourceneffizienz aufgrund zeitlicher Restriktionen oder auch mangelnder fachspezifischer Kompetenz der Beteiligten häufig keine ausreichende Berücksichtigung findet. Hilfestellung würden in diesem Zusammenhang geeignete methodische Instrumente bieten. Diese bedürfen jedoch einer noch zu leistenden Etablierung von offiziellen Standards für Kennzeichnungen und Zertifizierungen sowie Bewertungsgrößen, wie es etwa im Bereich der Finanzplanung üblich ist (vgl. Eversheim et al. 2010). Wie die Ausführungen zu Beginn der Arbeit zeigen, besteht speziell bei der Technologiebewertung die Herausforderung auch darin, eine aufwandsreduzierte, aber dennoch ganzheitliche Bewertung technologischer Lösungen im Anwendungskontext zu schaffen. Insbesondere besteht noch ein großer Bedarf für die Industrie und Forschung, geeignete (IT-gestützte) Werkzeuge zu entwickeln, die den Wissenszugang vereinfachen und der Tatsache Rechnung tragen, dass sich Technologieinhalte in Bezug auf Funktionen, Materialien oder Wirkweisen ständig weiterentwickeln. Beispielsweise könnten semantische Modelle und intelligente Suchwerkzeuge im Internet stärker genutzt werden, um automatisiert Informationen zu suchen und zu verarbeiten sowie Inhalte strukturieren zu können. Dabei müssten auch systemische und alternative Denkansätze – etwa unter Verwendung von Szenarios – gefördert werden, um Herausforderungen wie der Vermeidung von Reboundeffekten beizukommen.

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren ist aber nicht nur für die Integration der Ressourceneffizienz in die Produktentwicklung von Nutzen. Aufgrund der gebotenen Unterstützungsleistung kann es auch für die Anwendung „produktionsfernerer“ Technologien wie die Biotechnologie oder für neue Entwicklungsansätze wie die Bionik relevant sein. Auch hier müssen aus einer Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten, denen teilweise ganz neue Prinzipien zugrunde liegen und die außerhalb des unternehmerischen Kernbereichs liegen, geeignete Ansätze ausgewählt und adaptiert werden. Außerdem kann das entwickelte Verfahren auch dahingehend **erweitert werden**, dass Lösungsalternativen nicht nur für ein einzelnes Produkt, sondern auch für einen definierten Produktions- oder Verfahrensprozess identifiziert werden. So könnten etwa für allgemeine Anforderungen wie die Energieverbrauchsreduktion relevante Problembereiche analysiert und entsprechende Lösungsalternativen abgeleitet werden (vgl. Neugebauer et al. 2008).

Vor diesem Hintergrund erfordert der **Querschnittscharakter der Ressourceneffizienz** sowie die Konvergenz und branchenübergreifende Relevanz emergenter Technologien ein interdisziplinäres und integratives Vorgehen von Forschungs- und Unternehmensseite bei der Entwicklung von Anwendungen. Eine nachhaltige Umsetzung der Ressourceneffizienz verlangt zudem von Unternehmen, dass involvierte Unternehmensbereiche wie die Unternehmensführung, das Technologie- und Innovationsmanagement, die Forschung und Entwicklung sowie etwa das Marketing sich dem Thema gemeinsam strategisch annehmen. Hierzu ist auch eine interdisziplinäre Ausbildung von Ingenieuren und Wissenschaftlern zu fördern, die der der Ressourceneffizienz immanenten thematischen Komplexität gerecht wird (vgl. Rohn et al. 2010).

9 Abstract

The aim of this thesis is to develop a method for a resource efficient product development by using emerging technologies in the utilization phase of the product life cycle. The thesis pursues four sub-goals:

- systematically identify and analyse relevant resource consumption weak spots of a product
- to identify improved resource efficiency solution principles using formalized resource efficiency approaches and technological principles
- to undertake a holistic assessment to determine the conformity with the functional, the resource efficiency and the economic performance
- to determine that the method is applicable to the product development process and supports typical technology and innovation management activities

In this thesis resource efficiency is understood as a key strategy for achieving environmental sustainability and climate protection requirements. These are also in line with the market needs that are increasingly driving business to seek for eco-innovation solutions. Resource efficiency in this thesis is defined as the efficiency of the use of energy, material and water in the product life cycle with the aim of increasing value as defined by a beneficial output per resource input. A product is understood as a complex durable good from the machinery and plant engineering industry. Emerging technologies are capable of opening up new potential opportunities to improve product attributes, quality and user benefit.

However entrepreneurial practices demonstrate deficiencies in applying resource efficiency principles and implanting emerging technologies in a product. Hence companies need systematic methodologies to introduce the concept of resource efficiency into all phases of the product life cycle. These methodologies need to address existing resource consumptions to identify product weak spots – and then identify and holistically assess alternative technological solution principles creatively and practically. Too often this approach is missing. This thesis takes a holistic approach to mean an approach which considered the integrated life cycle and assesses functionality, resource efficiency as well as economic related impacts applying emerging technologies. This is needed to address the poor functionality, complexity and lack of process specification of existing environmental assessment tools, technology assessment tools and product development approaches.

With the proposed developed methodology, companies will be assisted in integrating resource efficiency increasing use of technological solution principles in products. The method is defined as a product development method. Existing resource inefficiency of the product will be identified and described through a weak point analysis of the utilization phase. Subsequently systematic technological solution principles will be developed. The identified alternative technological solution principles will address holistic requirements.

The method is based on a function based description which performs a translation between product and technology. Emerging technologies which have a potential to improve their resource efficiency can realise this potential using a resource efficiency related technological potential model. The model provides a method to access resource efficiency. Methodological approaches like TRIZ, weak point analyses, house of technology and scenario-technique are used in an adapted form to achieve this.

Preceding the search for solutions, the method identifies specific problems (weak spots) as potential starting points for which emerging technologies, in principle, can provide suitable solutions. These solutions could be incremental or radical by pursuing a new mean-purpose-combination. Old solutions may be replaced by complementary or new solutions. This method will open up the possibility of improving certain properties of the product, use new technological solution principles or integrate new product features. The aim is to increase the holistic

value of the product, by providing resource efficient solution to achieve competitive advantages. The benefit of the identified solution principle will be evaluated quantitatively and qualitatively with key performance indicators measured.

The method was applied with two companies within the packaging and car wash technology sector. Both companies received custom-designed access to resource efficiency solutions without significant time and cost investment. From this existing resource efficiency saving solutions as well as possible alternative resource efficiency increasing solution principles of emerging technologies are identified. Following assessment of a wide range of weak spots, relevant solution principles with typical resource efficiency solution patterns are chosen to shape the appropriate solution. For the identification and assessment of each solution expert knowledge was sought. The holistic value was assessed and methods for its implementation into practice were defined. Simple analysis of will ensure a transparent procedure and the adaptability on existing method.

The benefits for the companies were:

- a systematic, first-time access to the concept of resource efficiency. This enabled companies to consider possibilities for resource efficiency by themselves.
- new alternative technical solutions for product functions which allows a resource-efficiency improvement and a holistic benefit. The aimed customer benefit mainly effects cost reductions while utilisation.
- systematic selection and application of resource-efficiency-oriented innovation potentials. With this, an improved decision support was created.
- enrich the network of the companies by the competence area of resource-efficiency and new possible cooperation partners along the value chain were identified.

10 Anhang

10.1 Anhang A: Stand des Wissens

10.1.1 Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien

Eine Reihe wichtiger Zukunftstechnologien basieren z. T. auf speziellen Rohstoffen, die nur begrenzt verfügbar sind. Im Zusammenhang mit ihrem zukünftigen Einsatz in diesen Technologien ist bei entsprechenden Rohstoffen von einer steigenden Nachfrage auszugehen. Dieser Zusammenhang ist in Tab. 30 dargestellt.

Tab. 30: Globaler Rohstoffbedarf für Zukunftstechnologien im Jahr 2006 und 2030 im Verhältnis zur gesamten heutigen Weltproduktion des jeweiligen Rohstoffs (Angerer et al. 2009)

Rohstoff	Rohstoffbedarf [t]		Zukunftstechnologien	Weltproduktion in 2006 [t]
	2006	2030		
Gallium	0,28	6,09	Dünnschicht-Fotovoltaik, integrierte Chips	99
Neodym	0,55	3,82	Permanentmagnete, Lasertechnik	7.300
Indium	0,4	3,29	Displays, Dünnschicht-Fotovoltaik	580
Germanium	0,31	2,44	Glasfaserkabel, optische Technologien	90
Scandium	gering	2,28	Brennstoffzellen, Legierungselement	1,3
Platin	gering	1,56	Brennstoffzellen, Katalyse	221
Tantal	0,39	1,01	Mikrokondensatoren, Medizintechnik	1.400
Silber	0,26	0,78	RFID, bleifreie Weichlote	20.200
Zinn	0,62	0,77	bleifreie Weichlote, transparente Elektroden	302.000
Kobalt	0,19	0,4	Lithium Ionen-Akku	67.500
Palladium	0,1	0,34	Katalyse, Meerwasserentsalzung	224
Titan	0,08	0,29	Meerwasserentsalzung, Implantate	201.000
Kupfer	0,09	0,24	effiziente Elektromotoren, RFID	15.100.000
Selen	gering	0,11	Dünnschicht-Fotovoltaik, Legierungselement	1.541
Niob	0,01	0,03	Mikrokondensatoren, Ferroliegierung	45.000
Ruthenium	0	0,03	Farbstoffsolarzellen, Legierungselement	29
Yttrium	gering	0,01	Hochtemperatursupraleitung, Lasertechnik	7.000
Antimon	gering	gering	Mikrokondensatoren	134.000
Chrom	gering	gering	Meerwasserentsalzung, marine Techniken	9.010.000

10.1.2 Unterstützung des Umweltmanagements

Übersicht zu Managementmethoden im Bereich des betrieblichen Umweltschutzes

Zur Unterstützung betrieblicher umweltrelevanter Aktivitäten werden in der Praxis eine Reihe typischer Managementmethoden eingesetzt, die sich in allgemeine Klassen einteilen lassen. Die Tab. 31 gibt hierzu einen Überblick.

Tab. 31: Methodenklassen zur Unterstützung der betrieblichen umweltrelevanten Aktivitäten (vgl. Eckardt 2007)

Methodenklasse	Beschreibung
Umweltmanagement	Die Nutzung von Umweltmanagementmethoden wie Umwelt- und Umweltrechtsdatenbanken hängt von Art und Umfang der betrieblichen Umweltaspekte ab. Eine umfangreiche Nutzung erscheint für kleine und mittlere Unternehmen im Hinblick auf anzustrebende Verbesserungsmaßnahmen als nicht zielführend.
Produktionsintegrierter Umweltschutz	Methoden im Bereich des Stoffstrommanagements sind vor allem auf größere Unternehmen zugeschnitten, die im Rahmen des Produktions- und Logistik-Managements Stoff- und Energieflüsse bilanzieren. Die Erstellung von Input- und Outputanalysen als wichtiges Instrument ist beispielsweise für ein Umweltmanagementsystem nach ISO 14001 zentral.
Ökologische Technologie- und Produktbewertung	Methoden zur Durchführung von technologie- oder produktbezogenen Lebenszyklusanalysen sind vielfältig (vgl. Kap. 3.2.3.2). Beispiele sind Eco-indicator 95 bzw. 99, Ecopoints 97, CML 92, EPS 2000 und den LCI approach (VHK 2005) oder Umweltkennzahlen, ABC-Verfahren, kritische Volumina, Wirkungsäquivalente, ökologische Stoffbewertungen (vgl. z. B. Spath, Beucker 2003). Unterstützende Software-Programme wie UMBERTO, GaBi, GEMIS, TEAM, SimaPro und Balance ermöglichen eine ganzheitliche Bilanzierung.
Ökologische Produktentwicklung	Methoden zur Unterstützung des Prozesses der ökologischen Produktgestaltung sind in verschiedenen Ausprägungen vorhanden (vgl. Kap. 3.3.3).

Übersicht zu Software im Bereich des Umweltmanagements

Inzwischen werden in der Praxis des Umweltmanagements (bzw. dem produktionsintegrierten Umweltschutz oder der ökologischen Technologie- und Produktbewertung) auch eine Reihe von IT-Lösungen zur Informationsverarbeitung kommerziell angeboten und breit eingesetzt. Diese lassen sich entsprechend des Einsatzzweckes zuordnen (vgl. Tab. 32).

Tab. 32: Übersicht zu geläufigen IT-Lösungen zur Unterstützung des Umweltmanagements (Eckhardt 2007)

Name – Anbieter	Internetadresse	Beschreibung
Lebenszyklusanalyse-Tools		
GaBi – PE Europe GmbH und IKP, Universität Stuttgart	www.ikpgabi.uni-stuttgart.de	System zur ganzheitlichen Bilanzierung, Analyse und Bewertung von lebenszyklusrelevanten Fragestellungen
Gemis – Öko-Institut e. V.	http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm	Instrument zur vergleichenden Analyse von Umwelteffekten der Energiebereitstellung und -nutzung
SimaPro – ifu Institut für Umweltinformatik Hamburg	http://www.pre.nl/simapro/default.htm	umfangreiches Set an Bestandsinformationen und Impact-Assessment-Methoden
Balance – IER, Universität Stuttgart	http://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/modmeth/balance/index.html	datenbankbasiertes EDV-Programm zur Durchführung von Ökobilanzen
Umwelt- und Umweltrechts-Tools		

Name – Anbieter	Internetadresse	Beschreibung
ProBas – Öko – Institut e. V.	http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente CD-ROM Umweltrecht
Erich Schmidt Verlag GmbH & Co.	http://umweltonline.de/	CD-ROM Handwörterbuch des Umweltrechts PC-Umweltpraxis
MBO Verlag GmbH	http://www.lexsoft.de/	CD-ROM Nachschlagewerk für Umweltrecht, Fachbegriffe, Formulare und Adressen für Hersteller und Dienstleister
Umweltrechts-Informationen-System (URIS) – Erich Schmidt Verlag GmbH & Co	http://www.esv.info/katalog.html	Umweltrechtsdatenbank als CD-ROM mit allen Vorschriften des deutschen und internationalen Umweltrechts
Stoffstrommanagement-Tools		
AUDIT – Audit Software GmbH	www.audit.at	Energiebuchhaltung, Energieeinsparpotenziale und Energie-Controlling
Umberto – ifu Institut für Umweltinformatik Hamburg	http://www.umberto.de/	Darstellung, Analyse und Simulation von Stoff-, Energie- und Kostenströmen auf Betriebs-, Produkt- oder Prozessebene
MAQSIMA ECO (ehem. E-Bilanz) – Leicom AG	http://www.leicom.ch/2002/de/prod3.html	Energie-Controlling, Kostenrechnung, Prozessoptimierung REGIS
sinum AG	http://www.sinum.com/htdocs/d_software_download.shtml	Analyse von Stoffströmen, für ökologisches Controlling, Erstellung und Dokumentation von Stoff- und Ökobilanzen
Umweltmanagement-Tools		
UMsys – Inplus GmbH	www.inplus.de	integriertes Programmsystem für Umwelt-, Sicherheits- und Qualitätsmanagement
SoFi Software – PE Europe GmbH	http://www.sofisoftware.com/	betriebliche Umweltbilanzierung für Finanzdienstleister, Erfassung, Auswertung und Kommunikation betrieblicher Daten im Rahmen von EMAS und ISO 14001
SYCAT – Dr. Binner Consulting & Software	http://www.cim-house.de	Analyse, Modellierung, Simulation und Dokumentation von Geschäfts- und Betriebsprozessen
Weiterführende Suchmaschinen		
SoftGuide – Der Softwareführer	http://www.softguide.de/software/organisation.htm	Marktübersicht für betriebliche Software und Branchenlösungen
about IT – Stefan Bachert GmbH	http://www.aboutit.de	(C4.13 Hotelsoftware) Marktübersicht mit detaillierten Informationen über betriebliche Software 3 Tools für das Energie-, Umwelt- und Qualitätsmanagement 50

10.1.3 Methodische Integration der Ressourceneffizienz in Produkte

Weitere Methoden der Technologiebewertung

In der folgenden Tab. 33 werden in Ergänzung zu den Darstellungen in den Kap. 3.2.3.1 und 3.2.3.2 weitere Methoden der nutzen- und ressourceneffizienzbezogenen Technologiebewertung vorgestellt und kritisch gewürdigt.

Tab. 33: Weitere gängige Methoden der nutzen- und ressourceneffizienzbezogenen Technologiebewertung

Technologiebewertungsmethoden	Beschreibung und Diskussion
Technologiekalender	<p>Der Technologiekalender ist eine Methode der strategischen Technologieplanung und dient der systematischen Gegenüberstellung von Produkten und den einsetzbaren Technologien (Eversheim 1993). Dabei liegt der Betrachtungsschwerpunkt auf zeitlichen Entwicklungslinien. Der Aufbau eines Technologiekalenders besteht aus den vier Modulen Produktanalyse, Technologiezuordnung, Bewertung und Darstellung (vgl. Eversheim 1993). In der Produktanalyse werden zunächst die Produkte, die das größte Nutzenpotenzial für technologische Innovationen erwarten lassen, ausgewählt und in Komponenten zerlegt. In der Zuordnung werden dann die Komponenten mit den prinzipiell geeigneten Produktionstechnologien kombiniert. Anschließend werden in der Bewertung die möglichen Kombinationen in einem Portfolio analysiert und hinsichtlich der wirtschaftlichen und technischen Eignung sowie der organisatorischen Potenziale bewertet. Im Anschluss werden in der Darstellung die Bauteil-Produktionstechnologie-Kombinationen mit der zeitlichen Entwicklung in einer Kalenderdarstellung eingetragen.</p> <p>Die Durchführung des Technologiekalenders benötigt Informationen zu verschiedensten Produktionstechnologien, die umfassend und vollständig vorhanden sein müssen (Schuh et al. 1992). Der Zugang zu solchen Informationsquellen und insbesondere die konsistente Bereitstellung und kontinuierliche Nachführung aktueller Informationen ist allerdings mit großem Aufwand verbunden. Informationen über emergente Technologien sind in solchen Datenbanken meist nicht vorhanden, so dass sich die Produkt-Technologie-Verknüpfungen auf etablierte Technologien beschränken. Für die Auswahl gibt es zudem keine spezifischen technologie- oder funktionsbezogene Kriterien, sondern allgemeine Faktoren wie Kosten, Zeit und Qualität. Für eine ganzheitliche Bewertung unter Berücksichtigung der Ressourceneffizienz ist dies nicht ausreichend.</p>
Nutzwertanalyse	<p>Die Nutzwertanalyse ist eine Methode zur systematischen Entscheidungsvorbereitung bei der Auswahl von technologischen Lösungsalternativen etwa im Anschluss an einen Ideenfindungsprozess. In der Durchführung werden den Alternativen entsprechend ihrer Eigenschaften Werte zugeordnet, die eine Priorisierung ermöglichen sollen. Damit kann der Beitrag einer Alternative gemessen an den gegebenen Zielen ermittelt werden. Der Begriff Nutzwert ist als ein nicht-monetärer relativer Wert zu verstehen.</p> <p>Der Aufwand der Nutzwertanalyse ist allerdings als relativ groß einzustufen (Schäppi et al. 2005). Die Durchführung benötigt Informationen zu den verschiedenen Alternativen, die umfassend und vollständig ermittelt werden müssen. Der Zugang zu solchen Informationsquellen ist mit großem Aufwand verbunden, insbesondere im Fall von emergenten Technologien. Die ganzheitliche Bewertung benötigt zudem die methodische Nutzbarmachung unscharfer Informationen, um etwa die mehr oder weniger vorhandenen Ausprägungen eines Ressourceneffizienzpotenzials integrieren zu können. Die Nutzwertanalyse ist für eine aufwandsreduzierte und ganzheitliche Bewertung als nicht hinreichend geeignet anzusehen.</p>
Ökobilanz	<p>Die Ökobilanz oder auch Lebenszyklusanalyse (LCA) zielt auf eine umfassende Erfassung und Bewertung möglicher Umweltwirkungen von Technologien über den gesamten Lebensweg. Sie ist meist Bestandteil eines Vorgehens, um Entscheidungen zwischen technologischen Alternativen zu treffen und umweltrelevante Wirkungen in einem Entscheidungsprozess berücksichtigen zu können (vgl. Atik 2001).</p> <p>Die Vorgehensweise ist in der Normenserie DIN EN ISO 14040 normiert und besteht aus den Phasen¹⁵²: Zieldefinition, Sachbilanz, Wirkungsbilanz und Auswertung (DIN 1997). Ein Kernelement der Methodik stellt die Bildung eines Prozesskettenmodells entlang des Lebenszyklus dar, welches das zu betrachtende Bezugssystem abbildet. Das zentrale Ergebnis der Analyse ergibt die Darstellung sämtlicher in und aus dem System fließenden Stoffe (Inputs bzw. Outputs) bezogen auf eine festzulegende Bezugsgröße (funktionelle Einheit).</p> <p>Der mit der Methode der Ökobilanzierung verbundene Anspruch an Genauigkeit und Objektivität</p>

¹⁵² Diese Phasen haben eine hohe Allgemeingültigkeit und werden in ähnlicher Form prinzipiell auch in anderen Methoden wie MIPS durchlaufen.

Technologiebewertungsmethoden	Beschreibung und Diskussion
	<p>vität ist aus wissenschaftlicher Sicht positiv zu sehen. Jüngere Entwicklungen bringen auch zunehmend flexible Ansätze wie die simplified LCA (Christiansen 1997) hervor, die es erlauben, in Abhängigkeit der Zielstellung sowohl in der Tiefe als auch in der Breite der Untersuchung zu variieren. Zusammenfassend lässt sich jedoch festhalten, dass vollständige Ökobilanzen nach ISO 14040 ff. für die praxismgerechte ressourceneffizienzbezogene Bewertung von technologischen Lösungsprinzipien in der Regel zu zeitaufwändig und kostenintensiv und daher ungeeignet sind (vgl. Abele et al. 2008). Dies liegt auch darin begründet, dass die Bewertung eine umfassende Berücksichtigung umweltrelevanter Wirkkategorien (z. B. Eutrophierungs- oder Versauerungspotenzial¹⁵³) erfordert und sich nicht auf unternehmensrelevante Kategorien (z. B. Material- oder Energieverbrauch) beschränkt. Weitere aus dem Anspruch der Ganzheitlichkeit erforderlich werdende Bewertungsdimensionen (Funktionalität und Ökonomie) bleiben unberücksichtigt. Zudem sind Unternehmen von den anhaltenden Bewertungsdiskussionen etwa hinsichtlich der subjektiven Wirkungsabschätzungen z. T. verunsichert (vgl. Atik 2001).</p>

Weitere Ansätze der Produktweiterentwicklung

In Ergänzung zu den Darstellungen in Kap. 3.3.3 werden in Tab. 34 weitere Ansätze der ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung diskutiert.

Tab. 34: Weitere gängige Ansätze der ressourceneffizienzorientierten Produktweiterentwicklung

Ansätze	Beschreibung und Diskussion
<p>VDI-Richtlinie 2221</p>	<p>Die VDI-Richtlinie 2221 schlägt ein generelles Vorgehen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte vor – mit Betonung einer breiten Anwendung im Maschinenbau, der Feinwerktechnik, der Schaltungs- und Softwareentwicklung und der Planung von verfahrenstechnischen Anlagen (VDI 1993). Der Ablauf des Produktentwicklungsprozesses wird in diese vier Hauptphasen¹⁵⁴ aufgeteilt, wobei eine Vielzahl von produkt- und unternehmensspezifischen Varianten zulässig sind (Pahl et al. 2005):</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Planen und Klären der Aufgabe: informative Festlegung (Phase I) ● Konzipieren: prinzipielle Festlegung (Phase II) ● Entwerfen: gestalterische Festlegung (Phase III) ● Ausarbeiten: herstellungstechnische Festlegung (Phase IV) <p>Prinzipiell verläuft der Prozess von der Planung der Aufgabe und Klärung der Aufgabenstellung über das Erkennen der erforderlichen Funktionen, das Erarbeiten prinzipieller Lösungen, den Aufbau modularer Baustrukturen mit Baugruppen und Bauteilen bis hin zur Dokumentation des gesamten Produkts.</p> <p>In der ersten Phase müssen die Aufgaben geklärt werden. Hier werden Informationen über die Anforderungen, die an das Produkt gestellt werden sowie über die bestehenden Bedingungen und deren Bedeutung bereitgestellt. Das Ergebnis ist eine Anforderungsliste, die mit den Belangen der weiteren Arbeitsschritte abgestimmt sein muss (Pahl et al. 2005). Das Konzipieren findet in der zweiten Phase statt, bei der durch Abstrahieren auf die wesentlichen Probleme, Aufstellen von Funktionsstrukturen und durch die Suche nach geeigneten Lösungsprinzipien sowie deren Kombination die prinzipiellen Lösungen festgelegt werden (Pahl et al. 2005). Die Phasen Entwerfen und Ausarbeiten werden hier nicht weiter betrachtet, da sie für die Entwicklung des Verfahrens nicht von Interesse sind.</p>

¹⁵³ Eutrophierung bezeichnet allgemein die Anreicherung von Nährstoffen in einem Ökosystem. Versauerung bedeutet die Abnahme des pH-Werts etwa im Boden oder Wasser.

¹⁵⁴ Diese Einteilung und Ausrichtung ist typisch für Fragestellungen aus dem Bereich des Maschinenbaus (Pahl et al. 2005).

Ansätze	Beschreibung und Diskussion
	<p>Die VDI 2221 definiert den klassischen Rahmen einer Produktentwicklung. Dieser kann und muss für spezielle Anforderungen wie die Umsetzung von Ressourceneffizienzpotenzialen adaptiert werden (vgl. VDI 1993, Pahl et al. 2005). Der Ansatz bietet jedoch kein spezifisches Vorgehen zur Integration von neuartigen Lösungsansätzen emergenter Technologien in die Produktweiterentwicklung. Das Vorgehensmodell stellt vielmehr eine Strukturierungssystematik, die ein hilfreiches Grundgerüst auch für die ressourceneffizienzorientierte Produktweiterentwicklung liefern kann.</p>
Ökodesign	<p>Der Begriff des Ökodesigns wird in der Literatur nicht einheitlich verwendet und steht teilweise auch für Teilstrategien der umweltgerechten Produktentwicklung wie das erwähnte Design for Recycling. In einem umfassenderen Verständnis ist das Ökodesign als umweltorientierte Produktentwicklung zu begreifen, die umweltbezogene Anforderungen im Kontext zu funktionellen und ökonomischen Anforderungen über alle Phasen des Lebensweges (vgl. Kap. 3.3.2.2) eines Produktes berücksichtigt (Abele et al. 2008).</p> <p>Im Rahmen des Ökodesigns erarbeitete Ansätze wurden schon frühzeitig etwa von BREZET beschrieben, der acht Handlungsstrategien (vgl. Tab. 35) zur Verringerung der Umweltwirkungen von Produkten abgrenzt (Brezet, van Hemel 1997). Sie orientieren sich am Lebenszyklus eines Produkts, sind allgemein anerkannt und dienen als Grundlage für praxisnahe Konzepte des Ökodesigns (vgl. Birkhofer 2000, Wimmer 2004). Um Unternehmen die Erfüllung solcher Leitlinien zu erleichtern, gibt es eine Reihe praxiserleichter Werkzeuge wie beispielsweise den „Ecodesign Pilot“ von WIMMER (Wimmer 2001).</p> <p>Ökodesign ist ein Konzept, das eher für die frühen Phasen der Produktentwicklung also für Neuentwicklungen geeignet ist, in denen grundlegende kreative Fragestellungen vordergründig sind. Die Anwendung des Ökodesigns birgt grundsätzliche Herausforderungen, die sich zum einen durch Zielkonflikte mit anderen Produkteigenschaften (z. B. Kosten und Qualität) während des Entwicklungsprozesses ergeben können. Zum anderen erschweren fehlende Erfahrung und mangelnder Wissensstand in Bezug auf Ressourceneffizienz des Produktentwicklers die Anwendung des Ökodesigns (vgl. Grothe 2006). So gibt es etwa keine Zusammenstellungen von Prinzipien zur Steigerung der Ressourceneffizienz in Form von Lösungskatalogen, die eine Integration solcher Aspekte in Anwendungen begünstigen könnten.</p>
Ansätze zur Integration von Umweltaspekten in den betrieblichen Innovationsprozess	<p>In der Vergangenheit wurden verschiedene Ansätze zur Integration von Umweltaspekten in den betrieblichen Innovationsprozess basierend auf bestehenden Methoden, entwickelt. So ist etwa die Stage-Gate-Methode von COOPER eine in der unternehmerischen Praxis etablierte Methode, die den Innovationsprozess von der Idee bis zur Markteinführung gestaltet (Cooper 2001). Mit dieser Methode werden die auftretenden Fragestellungen interdisziplinär gelöst, um eine bessere Markt- und Kundenorientierung zu erreichen und die dem Prozess anhaftenden Risiken zu vermindern (Kleinschmidt et al. 1996, Herstatt, Verworn 2007).</p> <p>Dabei ist der Innovationsprozess in Phasen unterteilt, den so genannten Stages. Jede Phase besteht aus übergreifenden und parallel stattfindenden Aktivitäten und beginnt mit einem Tor, dem sog. Gate. Hier kommt das Projektteam zusammen und entscheidet auf Grundlage der gesammelten Informationen und anhand vorher definierter Kriterien, ob das Projekt fortgeführt oder abgebrochen werden soll.</p> <p>Basierend auf der Stage-Gate-Methode wurden auch bereits anforderungsbezogene methodische Erweiterungen entwickelt. So wurde von LANG et al. ein Ansatz zur integrierten Berücksichtigung von zu erwartender Umweltwirkungen einer Produktidee in den frühen Phasen des Innovationsprozesses entwickelt (vgl. Lang-Koetz et al. 2006). Dort können den einzelnen Phasen des Stage-Gate-Prozesses geeignete Handlungsstrategien einer umweltgerechten Produktgestaltung, z. B. von BREZET (vgl. Brezet, van Hemel 1997), zugeordnet werden.</p> <p>Der Ansatz erlaubt es, gesetzliche Anforderungen und Stakeholder-Anforderungen früh in den Innovationsprozess zu integrieren und mit der Berücksichtigung von Umweltwirkungen Richtungssicherheit im Sinne einer Nachhaltigen Entwicklung zu erreichen (Lang-Koetz et al. 2006). Für die ressourceneffizienzorientierte Weiterentwicklung von Produkten müssten allerdings die vorhandenen Erfahrungen zum Produkt methodisch nutzbar gemacht werden, wozu keine Hilfestellung geleistet wird. Zudem wird der Einsatz emergenter Technologien nicht unterstützt, deren Lösungspotenzial anschließend auch keine ganzheitliche Bewertung erfährt.</p>

Typische Strategien des Ökodesigns

Auf Basis umfangreicher Erfahrungen im Rahmen des Ökodesigns sind eine Reihe handlungsleitender Strategien erarbeitet worden, u. a. von BREZET (vgl. Tab. 35). Diese unterstützen die Gestaltung umweltgerechter Produkte.

Tab. 35: Praxisnahe Strategien des Ökodesigns (vgl. Brezet, van Hemel 1997, Birkhofer 2000, Wimmer 2004)

Strategien	Beschreibung
1. Auswahl von Materialien mit geringen Umweltwirkungen	Zu bevorzugen sind Materialien mit geringer Umweltgefährdung und geringem Ressourcenverbrauch, erneuerbare Materialien, recycelte Materialien, recycelbare Materialien und Materialien, die über eine geringe Materialintensität verfügen, ein geringes Umweltgefährdungspotenzial (z. B. Toxizität) besitzen und leicht zu entsorgen sind.
2. Reduktion des Werkstoffeinsatzes	Eine Dematerialisierung kann durch die Verwendung neuer Materialien erreicht werden, um Gewicht und Transportvolumen zu verringern. Dies führt auch zu geringerem Ressourcenverbrauch beim Transport des Produkts.
3. Optimierung der Produktion	Wenn das Produkt und dessen Herstellung schon klar definiert sind, kann der Ressourcenverbrauch bei der Produktion durch eine Optimierung der innerbetrieblichen Material- und Energieströme und der Produktionsprozesse optimiert werden. Dies gelingt z. B. durch alternative Produktionstechniken, weniger Produktionsschritte, eine energieeffiziente Herstellung, die Optimierung der Materialströme oder die Verringerung von Produktionsabfällen.
4. Optimierung der Distribution	Der Transport eines Produktes im Rahmen der Distribution kann zu erheblichen Umweltwirkungen führen. Eine Optimierung der Distribution kann z. B. durch eine verbesserte Verpackung (geringe Masse, umweltfreundliche und recycelbare Inhaltsstoffe) oder energieeffizienten Transport erreicht werden.
5. Optimierung der Nutzungsphase	Umweltwirkungen, die in der Nutzungsphase entstehen, können durch eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs reduziert werden, z. B. beim Einsatz von Hilfs- und Betriebsstoffen bei Betrieb und Wartung von Werkzeugmaschinen.
6. Verlängerung der Produktlebensdauer	Eine höhere Produktlebensdauer führt zu einem geringeren Ressourcenverbrauch bezogen auf den Produktnutzen. Diese kann durch eine höhere Zuverlässigkeit und Langlebigkeit, eine leichtere Wartung und eine verbesserte Reparierbarkeit, eine modulare Produktstruktur, klassisches Design und generell durch eine enge Produkt-Nutzer-Beziehung erreicht werden.
7. Optimierung des End-of-Life des Produkts	Das Produkt sollte so gestaltet sein, dass an seinem Lebensende eine Wiederverwendung, Wiederaufbereitung, Recycling oder eine Wiederverwertung durchgeführt werden kann.
8. Entwicklung eines neuen Produktkonzepts	Diese Strategie fokussiert auf neue, funktionale und umweltfreundliche Produktkonzepte: Im Zentrum der Überlegung stehen Fragen der Funktionsintegration der Funktionsoptimierung, der Dematerialisierung oder der Mehrfachnutzung des Produkts.

10.2 Anhang B: Konzeption des Verfahrens

10.2.1 Entwicklung der Modellelemente

Auswahl von Technologien mit Ressourceneffizienzpotenzial

Die folgende Tab. 36 zeigt die für die Ermittlung von relevanten Technologien grundlegende Zusammenstellung von Technologiefeldern mit Ressourceneffizienzpotenzial auf Basis des aktuellen Stands des Wissens. Entlang dieser Technologien wurden die RE-Standardlösungen in Kap. 4.1.3.3 definiert.

Tab. 36: Zusammenstellung von Technologiefeldern und Technologien mit Ressourceneffizienzpotenzial

Technologiefelder	Begründung für mögliche Ressourceneinsparungen	Typische Technologien
<p>Produktions- und Fertigungstechnologien</p>	<p>Die für die Produktion benötigten technologischen Verfahren und Systeme sind in der Industrie von großer Bedeutung. Aus Sicht der Ressourceneffizienz stehen speziell die sog. Querschnittstechnologien im Fokus, die sich einerseits durch vergleichsweise hohe Ressourceneffizienzpotenziale auszeichnen und andererseits in vielen Branchen Anwendung finden. Hier liegen bereits gut dokumentierte Erfahrungen vor (vgl. Rohn et al. 2010, Roland Berger 2007).</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Heiz- und Trocknungstechnologien wie die Infrarotstrahlung ● Beschichtungstechnologien wie Plasma- / Vakuumtechnik ● Reinigungstechnologien wie Vibrationstechnik etwa zur Metallentfettung ● Umformtechnologien für Stahl ● Aufbereitungstechnologien wie Membrantechnik ● abfallfreie Verfahren ● Recyclingtechnologien
<p>Informati- und Kommunikationstechnik und Elektrotechnik</p>	<p>Dieses Technologiefeld beinhaltet insbesondere Lösungen im Bereich der Antriebstechnik, Automatisierungstechnik und Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik. Im Bereich der Steuerung und Regelung können etwa mit der Mikrosystemtechnik als Querschnittstechnologie in vielen Bereichen Ressourceneinsparpotenziale erschlossen werden, so bei der Überwachung von Prozessen und Anlagen zur Instandhaltung, beim sparsamen Umgang mit Materialien oder Strukturen, in der elektronischen Steuerungs- und Regeltechnik, in der Aufbau- und Verbindungstechnik oder in Prozessintensivierungstechnologien (vgl. Pastewski et al. 2009).</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Energieautarke Sensoren ● autonom verteilte Mikrosysteme, miniaturisierte Elektronikkomponenten (z. B. RFID) ● Condition Monitoring zur Überwachung von Prozessen und Anlagen, Simulation
<p>Energietechnologien</p>	<p>Die Energietechnologien bieten Ansätze für Ressourceneffizienz, weil Maßnahmen im Bereich der Energieeffizienz auch häufig mit neuen Material-Lösungen erbracht werden. Da tendenziell von einem steigenden Energiebedarf in der produzierenden Industrie bei gleichzeitig steigenden Energiepreisen ausgegangen werden kann, ist in diesem Bereich von einem zunehmenden Innovationsgeschehen auszugehen (vgl. Neugebauer et al. 2008; Steinfeld, von Gleich 2010).</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Wärmedämmung und Wärme-Kältetechnik, Phasenwechselmaterialien ● Energieeffizienz wie Licht erzeugenden Techniken (OLED) ● Energiegewinnung / -wandlung wie die Photovoltaik ● Energiespeichertechnologien, -medien wie Li-Ionen Batterien, Redox-flow Elektrizitätsspeicher oder Kondensatoren
<p>Nanotechnologien</p>	<p>Der Ressourceneinsatz bei Nanomaterialien bietet grundsätzlich Einsparpotenzial – sei es direkt durch einen geringeren Materialaufwand bei dünneren Schichten oder indirekt etwa durch Energieeinsparungen (Coenen, Grunwald 2003). Weiterhin bietet die Nanotechnologie Optimierungspotenziale etwa durch die Verbesserung von Leichtbaumaterialien oder Schmierstoffen sowie durch besondere Fügeverfahren auf Basis schaltbarer Klebstoffe. Mit geeigneten Oberflächenbeschichtungen lassen sich beispielsweise die Eigenschaften von Anlagen in Bezug auf Verschleißfestigkeit, Korrosionsschutz oder Temperaturbeständigkeit optimieren (Heubach 2008). Allerdings werden bei nanotechnologischen Lösungen neben herkömmlichen Materialien teilweise auch sehr seltene Materialien eingesetzt, oder es kommen</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Oberflächentechnologien wie antibeschlag, -finger oder -fog-Effekt, hydrophile oder oleophile Eigenschaften, antihaft und antibakterielle Eigenschaften, UV-Schutz, Korrosionsschutz ● Bionische Lösungen nach dem Vorbild der Natur (Selbstreinigung), Membran- und Filtertechnologien

Technologiefelder	Begründung für mögliche Ressourceneinsparungen	Typische Technologien
	aufwändige und energieintensive Herstellverfahren zum Einsatz. ¹⁵⁵	
Prozessintensivierungstechniken	Als Prozessintensivierungstechniken werden hier solche Lösungen verstanden, die verfahrenstechnische Prozesse effizienter gestalten können. Hierzu zählen etwa Mikroreaktions- und Mikroverfahrenstechnik, neuartige Katalysetechniken und die Kopplung bestehender Verfahrenstechnik mit biotechnologischen Prozessen (Rohn et al. 2010). Vor dem Hintergrund der Ressourceneffizienz wird der Biotechnologie großes Interesse entgegengebracht, da sich diese dynamisch entwickelt und vielversprechende Anwendungen denkbar sind. Dies gilt insbesondere für Bereiche der Landwirtschaft, Chemie sowie Medizin und Pharmazie (Coenen, Grunwald 2003). Zunehmend gewinnt die industrielle Biotechnologie aber auch in anderen Branchen an Bedeutung (Reuscher et al. 2008).	<ul style="list-style-type: none"> • Mikroreaktionstechnik und Mikroverfahrenstechnik • Membrantechnologien • Enzymtechnologien, neuartige Katalyseverfahren, z. B. zur Verbesserung der Produktausbeute, Selbstorganisation¹⁵⁶, Kopplung bestehender Verfahrenstechnik mit biologischen Prozessen • überkritische Fluide¹⁵⁷
Materialtechnologien	Studien zeigen, dass rund 70 % aller technischen Innovationen direkt oder indirekt von den Eigenschaften der verwendeten Materialien abhängen. Dabei kann es sich um neue oder auch klassische Materialien handeln. Im gezielten Einsatz neuer Materialien liegen erhebliche Ressourceneffizienzpotenziale (BMBF 2006). Speziell die zunehmend zum Einsatz kommenden Materialverbünde gewinnen für ressourceneffiziente Anwendungen an Bedeutung, sei es um die Leistungsfähigkeit von Bauteilen zu steigern, Gewicht einzusparen, diese zu miniaturisieren oder spezifische Eigenschaften einzustellen (Brand et al. 2007).	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmedämmmaterialien • leichte Stoffe wie Aluminium, leichte Materialentwicklungen wie Hohlkugeln • Phasenwechselmaterialien • Füge- und Trenntechnologien für Stoffverbünde wie Bond-on-Command • selbstheilende Materialien • Technologien zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe, recycelbare, nachwachsende Materialien und Sekundärmaterialien • Materialverbünde wie Tailored Blanks, Hybridpolymeere

Verknüpfung von RE-Parametern und RE-Grundprinzipien

Die folgende Tab. 37 zeigt die im Kap. 4.1.3.3 beschriebene Gegenüberstellung der RE-Parameter mit den fünf RE-Grundprinzipien.

¹⁵⁵ Für einzelne Nanomaterialien und Anwendungen der Nanotechnologie wurden bereits Lebenszyklusanalysen durchgeführt. Diese zeigen meist eine Verringerung der Umwelteinwirkungen im Vergleich zu gegenwärtigen Konkurrenztechnologien (Lukas et al. 2007).

¹⁵⁶ Die Selbstorganisation ist ein Bauprinzip, nach dem auch Wachstums- und Strukturbildungsprozesse in der Natur ablaufen. Dabei fügen sich einzelne Bausteine wie Moleküle, Atome oder Partikel, zu Einheiten zusammen und treten miteinander in Wechselwirkungen. Merkmal der Selbstorganisation ist, dass die Informationen zur Strukturbildung in den einzelnen Bausteinen gespeichert werden (Steinfeld, Gleich Armin von 2010).

¹⁵⁷ Überkritische Fluide sind gasförmige Stoffe mit Eigenschaften, die zwischen denen eines Gases und einer Flüssigkeit liegen. Fluide werden als Lösungs- und Reaktionsmittel in der Stofftrennung, bei der Herstellung und Verarbeitung von Materialien und bei chemischen Reaktionen eingesetzt (VDI 2008).

Tab. 37: Korrelation der RE-Parametern zu geeigneten RE-Grundprinzipien mit beispielhaften Kurzerklärungen

RE-Parameter	Substitution von Ressourcen (GP1)	Steigerung der Effizienz (GP2)	Minderung von Abfall/Ausschuss (GP3)	Verlängerung der Lebensdauer (GP4)	Optimierung der Kreislauffähigkeit (GP5)
PEF	○	● (Steigerung prozessbezogener Energieeffizienz in Komponente)	○	○	○
PMF	○	● (Steigerung prozessbezogener Materialeffizienz in Komponente)	○	○	○
PEP	○	● (Steigerung Energieeffizienz im Produkt)	○	○	● (Schließung Energiekreisläufe im Produkt)
PMP	○	● (Steigerung Materialeffizienz im Produkt)	● (Reduktion Materialverbrauch)	○	● (Schließung Materialkreisläufe)
PEPS	○	● (Steigerung Energieeffizienz im Produktionsschritt)	○	○	● (Schließung Energiekreisläufe im Produktionsschritt)
PMPS	○	● (Steigerung Materialeffizienz)	○	○	● (Schließung Materialkreisläufe)
MEF	● (Materialersatz in der Komponente zur Energieverbrauchssenkung)	● (Steigerung Energieeffizienz in Komponente)	○	○	○
MMF	● (Materialersatz in der Komponente zur Materialverbrauchssenkung)	● (Steigerung Materialeffizienz)	○	● (Optimierung Materialbeständigkeit)	○
MEP	● Materialersatz im Produkt zur Energieverbrauchssenkung)	● (Steigerung Energieeffizienz im Produkt)	○	●	○
MMP	● (Materialersatz im Produkt zur Materialverbrauchssenkung)	● (Steigerung Materialeffizienz im Produkt)	● (Reduktion Materialeinsatz im Produkt)	● (Optimierung Materialbeständigkeit)	○
MEPS	○	● (Steigerung Energieeffizienz durch Materialien)	○	○	○
MMPS	○	● (Steigerung Materialeffizienz durch Materialien)	○	○	○

Legende: hohe Einflussmöglichkeit ● Einflussmöglichkeit denkbar ○ keine Einflussmöglichkeit ○

10.3 Anhang C: Entwicklung des Verfahrens

10.3.1 Identifikation der ressourceneffizienzbezogenen Probleme im Produkt

Details zur Auswahl des Produktes

Die folgende Tab. 38 zeigt die benötigte Ressourceneffizienz-Checkliste zur Auswahl eines für die Anwendung des Verfahrens geeigneten Produktes in Schritt 1.b (vgl. Kap. 5.1.2.2).

Tab. 38: Ressourceneffizienz-Checkliste zur Auswahl eines Produktes (vgl. Rohn et al. 2009)

Kriterien \ Produkte	"Produkt A"	"Produkt B"	"Produkt C"
Produktion pro Jahr:			
1. Stückzahlen			
2. Umsatz in EUR			
Wirtschaftlicher Erfolg (0 = niedrig, 1 = mittel, 2 = hoch)			
Anteil am Gesamtumsatz			
Wettbewerbsvorteil gegenüber vergleichbaren Konkurrenzprodukten			
Kundenzufriedenheit			
Marktchancen			
zukünftige Bedeutung für das Unternehmen			
Anteil am gesamten Produktportfolio			
technologische Innovationsfähigkeit			
Summe:			
Ressourceneffizienzbezogene Faktoren (0 = niedrig, 1 = mittel, 2 = hoch)			
Energieverbrauch			
Wasserverbrauch			
Inputs an nicht erneuerbaren Ressourcen			
Abfallanfall			
Umwelteinwirkungen nach der Entsorgung			
Gefahrstoffmenge / -qualität			
Gewicht			
geringe Langlebigkeit und Reparierfähigkeit			
Komplexität der Materialzusammensetzung / Teilevielfalt /			

Kriterien \ Produkte	"Produkt A"	"Produkt B"	"Produkt C"
Verbundwerkstoffe und geringes Recyclingpotenzial			
Summe:			
Gesamtsumme:			

Die in der Checkliste aufgelisteten Eigenschaften werden entsprechend ihrer Gültigkeit mit „gering“ (= 0 Punkte), mit „mittel“ (= 1 Punkt) oder „hoch“ (= 2 Punkte) bewertet. Bewertungsgrundlagen sind diverse unternehmensinterne Quellen mit entsprechenden Informationen (z. B. betriebliche Informationssysteme) sowie etwa Kundenbefragungen. Nach der vollständigen Bewertung können die Gesamtsummen je Produkt berechnet werden und damit eine Auswahl ermöglichen. Jenes Produkt, welches die höchste Gesamtsumme erhält, verspricht aufgrund seiner Eigenschaften am ehesten lohnende Ressourceneffizienzpotenziale.

Details zur Ermittlung von Schwachstellen

Auf Basis der Tab. 39 kann im Schritt II.a des Verfahrens die Ermittlung von Schwachstellen unterstützt werden (vgl. Kap. 5.2.2.1).

Tab. 39: Ressourceneffizienz-Checkliste mit beispielhaften Schwachstellen (vgl. Rohn et al. 2007)

Material- und prozessbezogene Fragen	Beispielhafte Nennungen material- bzw. prozessbezogener Schwachstellen
Gibt es Materialien, die besonders zum Ressourcenverbrauch in der Nutzungsphase des Produktes beitragen?	Die schlechte Isolation der Stahlwand führt zu einem hohen Energieverbrauch.
Gibt es Materialien, die suboptimale Oberflächeneigenschaften hinsichtlich Korrosionsbeständigkeit, Wetterfestigkeit, Waschbarkeit usw. in der Nutzungsphase des Produktes aufweisen?	Stahl führt zu einer hohen Korrosionsanfälligkeit (Materialbedarf) bei der Außenwand.
Gibt es Materialien, die zu schlechten lebensdauerbestimmenden Eigenschaften wie hohe Materialermüdungen und Verschleißanfälligkeit oder schlechter Reparaturfreundlichkeit in der Nutzungsphase des Produktes führen?	Stahl führt zu einem hohen Verschleißanfälligkeit (Materialbedarf) bei der Außenwand.
Gibt es Materialien, die einen hohen „ökologischen Rucksack“ bezüglich deren Lebenswegs (Fokus Nutzungsphase) haben? ¹⁵⁸	Die Herstellung von Edelstahl hat einen hohen Material- und Energiebedarf.
Gibt es Prozesse, die einen hohen Energieverbrauch haben oder Energieformen mit hohen ökologischen Rucksäcken benötigen?	Der Heizprozess hat einen hohen Energieverbrauch.
Gibt es Prozesse, die einen hohen Bedarf an Betriebsstoffen haben?	Der Waschprozess hat einen hohen Wasserverbrauch.
Gibt es Prozesse, die durch interne schließbare Stoffkreisläufe optimiert werden können?	Das Wasser wird im Reinigungsprozess nicht wiederverwendet.
Gibt es Prozesse, die durch interne schließbare Energiekreisläufe optimiert werden können?	Der Heizprozess hat einen hohen Energieverbrauch (Wärmeabstrahlverluste).

¹⁵⁸ Fragen, die hierunter subsumiert werden können sind folgende: Gibt es Materialien, die durch erneuerbare, recycelte und/oder recycelbare oder langjährig verfügbare ersetzt werden können? Gibt es Materialien, die nicht bekannt bzw. gekennzeichnet oder Gefahrstoffe sind? Gibt es Materialien, die zu schlechten Entsorgungs-/ Recyclingeigenschaften führen, z. B. aufgrund der hohen Werkstoffvielfalt wie Verbundstoffe?

Material- und prozessbezogene Fragen	Beispielhafte Nennungen material- bzw. prozessbezogener Schwachstellen
Gibt es Prozesse, bei denen die Ausschussraten weiter reduziert werden können?	Der Umformungsprozess hat einen hohen Materialausschuss.
Gibt es Prozesse, bei denen Informationen über den Prozessverlauf (keine produktbegleitenden Informationssysteme) oder automatische "sleep"- oder "power down"-Funktionen oder Toleranzen gegen Fehlbedienung (Mehrverbrauch, Ausschußproduktion, Bauteilzerstörung) fehlen?	Der Heizprozess hat einen hohen Energieverbrauch, da die Steuerung nicht optimal ist.

10.3.2 Bewertung der Ressourceneffizienz

Übersicht zu den Herausforderungen der Bewertung

Die Tab. 40 bietet eine Übersicht zu den Anforderungen bzgl. der Berücksichtigung von Lebenszyklusphasen, den notwendigen Maßnahmen zur Datenbeschaffung und der Bestimmung repräsentativer Kennzahlen bei der dreidimensionalen Bewertung im Schritt IV.b des Verfahrens (vgl. Kap. 5.4.2.2).

Tab. 40: Herausforderungen der dreidimensionalen Bewertung eines Lösungsprinzips

Anforderungen	Relevante Lebenszyklusphasen aus Sicht des Herstellers			Relevante Lebenszyklusphasen aus Sicht des Anwenders			Relevante Maßnahmen zu der Datenbeschaffung			Relevante Kennzahlen
	Vorgelagerte Phasen	Nutzungsphase	Nachgelagerte Phase	Vorgelagerte Phasen	Nutzungsphase	Nachgelagerte Phase	Daten neu bestimmen	Daten recherchieren	Daten abschätzen	Einheiten
Schritt IV.a: Funktionalitätsbewertung	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/> (Experten)	<input checked="" type="radio"/>	Leistung: Erfüllungsmaß Funktion z. B. [kW]
Schritt IV.b: Ressourceneffizienzbewertung	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/> (berechnen etc.) ¹⁵⁹	<input checked="" type="radio"/> (Quellen) ¹⁶⁰	<input checked="" type="radio"/> ¹⁶¹	Ressourcenverbrauch: MIPS z. B. [kg]
Schritt IV.c: Kostenbewertung	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/> (Kunden)	<input checked="" type="radio"/>	Kosten: Einsparung z. B. [€]

Legende: relevant teilweise relevant größtenteils nicht relevant

¹⁵⁹ Messungen liefern spezifische Daten und meist verlässliche Ergebnisse.

¹⁶⁰ Literaturrecherchen sind oft die einzige Möglichkeit, an Daten über Vorgänge zu kommen, die außerhalb des Unternehmens liegen. Dabei können Fachbücher, Datenbanken etc. herangezogen werden.

¹⁶¹ Nutzung von Vergleichsdaten aus ähnlichen Zusammenhängen wie die Verwendung von Aluminium-bezogenen Stoffdaten für die Bewertung von Magnesium-bezogenen Stoffdaten, da diese besser dokumentiert sind.

Details zum Rohstoffversorgungs-Risiko

Die Bewertung der Versorgungslage von bestimmten Ressourcen bzw. Rohstoffen ist von hohem volkswirtschaftlichen Interesse und wird etwa vom Institut der deutschen Wirtschaft Köln durchgeführt und veröffentlicht. Die folgende Tab. 41 zeigt eine Zusammenstellung wichtiger Rohstoffe, die ggf. im Schritt IV.b des Verfahrens von Belang sein können.

Tab. 41: Das Rohstoffversorgungs-Risiko-Rating des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln (Stand 2005) (Bardt 2008)

Risiko	Rohstoff	Statistische Reichweite der Produktion in Jahren	Konzentration auf die drei größten Länder [%]	Konzentration auf die größten Unternehmen [%]	Fehlende Substituierbarkeit	Anwendungsgebiete
***	Chrom	187	74 (Südafrika, Indien, Kasachstan)	53	nicht substituierbar	Edelstahl, Chemie, Farben
***	Molybdän	46	79 (USA, Chile, China)	49	nicht substituierbar	Edelstahl, Farben, Schmierstoffe, Flugzeugbau, Katalysatoren, Elektronik
***	Niob	130	99 (Brasilien, Kanada, Australien)	80	schlecht substituierbar	Edelstahl, Flugzeugturbinen
***	Platin, Palladium, Rhodium	154	92 (Südafrika, Russland, Kanada)	73	nicht substituierbar	Autoindustrie, Chemie, Schmuck, Medizintechnik, Brennstoffzellen
***	Tantal	29	84 (Australien, Mosambik, Brasilien)	68		Kondensatoren, Medizintechnik, chemische Apparate
***	Zirkon	33	87 (Australien, Südafrika, USA)	62	zum Teil nicht substituierbar	Keramikglasuren, Gießereien, Chemie, Bildröhren
**	Baryt	25	72 (China, Indien, USA)	-		Schwerbeton, Füllstoff in Papier und Farbe, Chemie, Röntgenkontrastmittel
**	Fluorit	44	76 (China, Mexiko, Mongolei)	-	schlecht substituierbar	Stahl- und Gusseisenerzeugung, Chemie, Emaille, Glasuren, Optik
**	Lithium	228	79 (Chile, Australien, Argentinien)	58		Aluminium-Verhüttung, Keramik, Glas, Batterien, Medizin, Chemie
*	Blei	20	67 (China, Australien, USA)	22		Akkumulatoren, Elektrotechnik

Risiko	Rohstoff	Statistische Reichweite der Produktion in Jahren	Konzentration auf die drei größten Länder [%]	Konzentration auf die größten Unternehmen [%]	Fehlende Substituierbarkeit	Anwendungsgebiete
*	Titan	134	68 (Australien, Südafrika, Kanada)	56		Edelstahl, Flugzeugbau, Schiffbau, Anlagenbau, Medizintechnik, Farben
*	Wolfram	39	95 (China, Russland, Österreich)	<10		Edelstahl, Hartmetall, Leuchtmittel
*	Zinn	20	81 (China, Indonesien, Peru)	40		Weißblechherstellung, Elektronik, Chemie

Legende: relevant *** = besonders kritisch (3 Kriterien erfüllt), ** = weniger kritisch (2 Kriterien erfüllt), * = weniger kritisch (1 Kriterium erfüllt)

Stand: 2005; Auswahl: betrachtet wurden alle wichtigen Rohstoffe, kritisch ist die Versorgungslage nur bei den genannten metallischen Stoffen; Konzentration: Werte auf Länderebene für Niob von 2004, Werte auf Unternehmensebene für Kobalt und Niob von 2003, für Tantal von 2004, Blei, Titan und Zinn aufgrund hoher Recyclingfähigkeit als „weniger kritisch“ klassifiziert; Ursprungsdaten: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

10.4 Anhang D: Umsetzung des Verfahrens

Details zur Umsetzung beim Unternehmen Alpha

Dieser Gesprächsleitfaden zur Unterstützung der Experteninterviews in Schritt III.c des Verfahrens (Kap. 5.3.2.3) umfasst zwei Bereiche, einen allgemeinen und einen speziellen Abschnitt. Die Fragen zielten darauf ab, wesentliche Aspekte der zu ermittelnden Lösungsprinzipien im Kontext der potenziellen Anwendung abzufragen. Die Darstellung in Tab. 42 zeigt eine beispielhafte Version für die Anwendung im Unternehmen Alpha.

Tab. 42: Beispielhaft ausgefüllter Gesprächsleitfaden für das Unternehmen Alpha

Gesprächsleitfaden					
Ort / Datum:	Stuttgart, 22.09.10				
Institution:	Fraunhofer-Institut				
Ansprechpartner:	Daniel Heubach				
Bezeichnung der Technologie:	Trocknung mit überhitztem Wasserdampf				
Teil A: Allgemein					
technologische oder marktlich / gesellschaftliche Trends im Themengebiet	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von Algen für prozesstechnische Zwecke • Zusammenfassen und Eliminieren von Prozessschritten 				
Beschreibung des technologischen Prinzips:	<table border="1"> <tr> <td>Qualitativ:</td> <td>Quantitativ</td> </tr> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> • größerer Wärmeübertragungskoeffizient von überhitztem Wasserdampf (doppelt so hoch wie bei Luft) • Vorteile dieses Verfahrens könnten nur zum Teil genutzt werden </td> <td>-</td> </tr> </table>	Qualitativ:	Quantitativ	<ul style="list-style-type: none"> • größerer Wärmeübertragungskoeffizient von überhitztem Wasserdampf (doppelt so hoch wie bei Luft) • Vorteile dieses Verfahrens könnten nur zum Teil genutzt werden 	-
Qualitativ:	Quantitativ				
<ul style="list-style-type: none"> • größerer Wärmeübertragungskoeffizient von überhitztem Wasserdampf (doppelt so hoch wie bei Luft) • Vorteile dieses Verfahrens könnten nur zum Teil genutzt werden 	-				

Gesprächsleitfaden	
	<ul style="list-style-type: none"> neue Prozessführung sollte in diesem Zuge ebenfalls überlegt werden
Ressourceneffizienzpotenzial	Potenzial vorhanden, speziell bzgl. der gesamten Prozesskette
Umweltwirkung	keine nennenswerte
Markteinführung (ggf. Abschätzung)	für derartige Medien noch nicht getestet
Grundsätzlich mögliche Anwendungen	-
Mögliche Erfolgsfaktoren / Hemmnisse / Risiken der Umsetzung technisch:	<ul style="list-style-type: none"> Prozesstechnische Änderungen sind notwendig, damit der Dampf optimal wirkt (z. B. müsste das Medium in Bewegung versetzt werden). Aufgrund der glatten, nicht porösen Oberfläche des Mediums kommen nicht alle Vorteile zum Trage.
Kommentare:	Die gesamte Prozesskette müsste analysiert werden. Eine Kombination von Technologien könnte hier sinnvoll sein; dadurch könnten evtl. Prozesse (Ausblasen der Gefäße mit Luft) komplett entfallen. Eine mögliche Lösung könnte eine Kombination von Heißluft (zum Transport der Feuchte nach außen) und Mikrowellentechnologie zur Trocknung sein. Die Steuerung könnte durch ein optisches System erfolgen. Vorteil: Eine gezielte Wärmebeaufschlagung wäre möglich. Durch die Wirkungsweise der Mikrowellen (Wärmeerzeugung von innen nach außen) wäre gesichert, dass die gemessene Temperatur an der Oberfläche auch der Temperatur zur Sterilisation entspricht. Genauigkeit bis +/- 5 Kelvin möglich. Weiterhin könnte die Überwachung der Temperatur dokumentiert werden und den Pharmakunden (als Dokumentation in seinem Qualitätssicherungsprozess) überlassen werden.
Teil B: Speziell → bezogen auf Anwendungsfall	
Beschreibung der Anwendung bezogen auf die zu bewertende Technologie	Überhitzter Dampf, Wasserdampf oberhalb der Siedetemperatur, enthält keine Wassertropfen und ist quasi trocken. Das Verfahren nutzt die Eigenschaft von überhitztem Wasserdampf, mehr Wasserdampfmoleküle aufnehmen zu können als gesättigter Wasserdampf. Wenn das zu trocknende Material überhitztem Dampf bei 120-180 Grad Celsius ausgesetzt wird, erhitzt es sich und gibt seine Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf ab. Hierbei kühlt sich die Dampfatmosphäre durch die Abgabe der Verdampfungswärme ab. Diese Wärmeenergie wird dem Dampf wieder zugeführt, wodurch dieser auf seiner Solltemperatur gehalten wird und kontinuierlich eine weitere Wasseraufnahme möglich ist. Überschüssige Feuchtigkeit wird als gesättigter Dampf abgezogen oder kondensiert.
Sammlung relevanter Kenndaten der Anwendung	
Bedingungen im Anwendungsfall	<ul style="list-style-type: none"> Länge: Einlauf: 300 mm; Heißteil: 915 mm, Kühlteil 1 + 2: je 800 mm; Breite: 1500mm, Höhe: 250mm; Medium: Glas zu gewährleistende Sterilisationswirkung: 3 log-Stufen
Abschätzung einer möglichen Umsetzung in der Anwendung	

Details zu Berechnungen für das Lösungsprinzip „Reinigen mit CO₂“ des Unternehmens Alpha

Die folgende Tab. 43 zeigt die Details der MIPS-Wert-Berechnung für das Referenzlösungsprinzip „Reinigen mit Wasser“ (LR18) und das alternative Lösungsprinzip „Reinigen mit CO₂“ (L18) im Rahmen der Verfahrensumsetzung beim Unternehmen Alpha.

Tab. 43: MIPS-Werte der Referenzlösung „Reinigen mit Wasser“ (LR18) und des alternativen Lösungsprinzips „Reinigen mit CO₂“ (L18) des Unternehmens Alpha (Lebensdauer der Anlage beträgt 10 Jahre)

Reinigung mit Wasser				Erhebungskategorien						Annahmen	
Lebenszyklusphase	Ressource bzw. Untersuchungsgegenstand	Vorprodukt	Einheit	Menge	abiotisches Material		Wasser		Luft		MIT-Wert verwendet
					MIT-Wert	Hauptprodukt	MIT-Wert	Hauptprodukt	MIT-Wert	Hauptprodukt	
					kg/kg	kg	kg/kg	kg	kg/kg	kg	
Vorgelagerte Phase	Herstellung Reinigungsmaschine										
	Filtergehäuse		kg	5,00	14,43	72,15	205,10	1025,50	2,825	14,125	Edelstahl
	Pumpe Umpumpwasser		kg	50,00	14,43	721,50	205,10	10255,00	2,825	141,250	Edelstahl
	Pumpe UW Gleitringdichtung		kg	1,00	5,70	5,70	146,00	146,00	1,650	1,650	Kautschuk
	Pumpe UW Gehäusedichtung		kg	1,00	5,70	5,70	146,00	146,00	1,650	1,650	Kautschuk
	Behälter UW		kg	5,00	14,43	72,15	205,10	1025,50	2,825	14,125	Edelstahl
	Tauchheizkörper		kg	15,00	14,43	216,45	205,10	3076,50	2,825	42,375	Edelstahl
	Kühlwasser		kg	4.000,00	0,01	40,00	1,30	5200,00	0,001	4,000	
	Energie		kWh	2.000,00	2,67	5340,00	37,90	75800,00	0,640	1280,000	elektrischer Strom, industrielle Eigenenerzeugung
		Σ Vorgelagerte Phase		kg			6473,65		96674,50		1499,175
Nutzung	MIT-Wert Berechnungen		10								
	Frischwasser										

Reinigung mit Wasser		Erhebungskategorien						Annahmen		
	Speisewasser	kg	1,08	0,01	0,01	1,30	1,40	0,001	0,001	Trinkwasser
	Kühlwasser	kg	1,07	0,01	0,01	1,30	1,39	0,001	0,001	Trinkwasser
	Dampf	kg	0,326	0,00	0,00	0,20	0,06	0,850	0,277	15 % Trinkwasser
	MIT-Wert Frischwasser				0,02		2,86		0,279	
	Sterilluft									
	Strom	kW	0,006	2,67	0,02	37,90	0,21	0,640	0,004	elektrischer Strom, industrielle Eigenerzeugung
	MIT-Wert Sterilluft				0,02		0,21		0,004	
	Frischwasser	kg	60.882,056,00	0,02	1.217,641,12	2,86	174.122,680,16	0,279	16.986,093,62	Frischwasser, eigene Berechnung
	Sterilluft	kg	177.390,00	0,02	3.547,80	0,21	37.251,90	0,004	709,56	Sterilluft, eigene Berechnung
	Silikon	kg	1.579,60	5,70	9.003,72	146,00	230.621,60	1,650	2.606,34	Styrol, Butadien, Kautschuk
	Energie	kWh	1.476,060,00	2,67	3.941,080,20	37,90	55.942,674,00	0,640	944.678,40	elektrischer Strom, industrielle Eigenerzeugung
	Wartung									
	Edelstahl	kg	25,00	14,43	360,75	205,10	5.127,50	2,825	70,63	Edelstahl
	Dichtungen	kg	1,00	5,70	5,70	146,00	146,00	1,650	1,65	Kautschuk
	Kühlwasser	kg	200,00	0,01	2,00	1,30	260,00	0,001	0,20	Trinkwasser

Reinigung mit Wasser		Erhebungskategorien				Annahmen		
	wasser							
	Energie kWh	200,00	2.87	534,00	37,90	7.580,00	0,640	128,00
	Σ Nutzung kg			5.172.175,29		230.346.341,16		17.934.288,40
Nachgelagerte Phase								
Summe				5.178.649		230.443.016		17.935.778
MI [kg/Gefäß]				0,20		8,77		0,68

Reinigung mit CO ₂		Erhebungskategorien						Annahmen				
Lebenszyklusphase	Ressource bzw. Untersuchungsgegenstand	Vorprodukt	Einheit	Menge	abiotisches Material		Wasser		Luft		MIT-Wert verwendet	
					MIT-Wert	Hauptprodukt	MIT-Wert	Hauptprodukt	MIT-Wert	Hauptprodukt		
Vorgelagerte Phase	Zubehör Reinigungsmaschine											
	Tank CO ₂		kg	50,00	14,43	721,50	205,10	10255,00	2,825	141,250		Edelstahl
	Tank Beschleunigungsgas		kg	50,00	14,43	721,50	205,10	10255,00	2,825	141,250		Edelstahl
	Hochdruckkompressor		kg	50,00	14,43	721,50	205,10	10255,00	2,825	141,250		Edelstahl
	Dichtungen		kg	2,00	5,70	11,40	146,00	292,00	1,650	3,300		Kautschuk

Reinigung mit CO ₂		Erhebungskategorien						Annahmen				
	Kühlwasser		kg	4.000,00	0,01	40,00	1,30	52000,00	0,001	4,000	Trinkwasser	
	Energie		kWh	2.000,00	2,67	5340,00	37,90	758000,00	0,640	1280,000	elektrischer Strom, industrielle Eigenerzeugung	
	Σ Vorgelagerte Phase		kg			7555,90		112057,00		1711,050		
Nutzung	MIT-Wert Berechnungen		10									
	CO2											
		Diesel	kg	0,36	1,36	0,49	9,70	3,52	3,219	1,169	Diesel	
		Wasser	kg	8,57	0,01	0,09	1,30	11,14	0,001	0,009	Trinkwasser	
		Strom	kg	0,47	2,67	1,26	37,90	17,87	0,640	0,302	elektrischer Strom, industrielle Eigenerzeugung	
		MIT-Wert CO2				1,84		32,53			1,479	
		CO2		kg	9460,80 0,00	1,84	17.407,87 2,00	32,53	307.759,8 24,00	1,479	13.992,52 3,20	CO2, eigene Berechnung
		Beschleunigungsgas		kg	361.350,00	0,19	68.656,50	7,70	2.782.395,00	1,051	379.778,8 5	Stickstoff, gasförmig
		Frischwasser		kg	55.188,00 00,00	0,02	1.103.760,00	2,86	157.837,6 80,00	0,279	15.397,45 2,00	Frischwasser, eigene Berechnung
		Sterilluft		kg	137.970,00	0,02	2.759,40	0,21	28.973,70	0,004	551,88	Sterilluft, eigene Berechnung
	Silikon		kg	1.579,60	5,70	9.003,72	146,00	230.621,6 0	1,650	2.606,34	Styrol, Butadien, Kautschuk	
	Energie		kWh	876.000,00	2,67	2.338.920,00	37,90	33.200,40 0,00	0,640	560.640,0 0	elektrischer Strom, industrielle Eigenerzeugung	

Reinigung mit CO ₂		Erhebungskategorien						Annahmen		
Wartung gesamt										
	Edelstahl	kg	25,00	14,43	360,75	205,10	5.127,50	2.825	70,63	Edelstahl
	Dichtungen	kg	1,00	5,70	5,70	146,00	146,00	1,650	1,65	Kautschuk
	Kühlwasser	kg	200,00	0,01	2,00	1,30	260,00	0,001	0,20	Trinkwasser
	Energie	kWh	200,00	2,67	534,00	37,90	7.580,00	0,640	128,00	elektrischer Strom, industrielle Eigenenerzeugung
Σ Nutzung	kg			20.931,87 4,07		191.310,7 88,80			15.961,45 0,70	
Nachgelagerte Phase										
Summe					20.939,43 0	191.422,8 46			15.963,16 2	
MI [kg/Gefäß]					0,82	7,28			0,61	

Die folgende Tab. 44 zeigt die Details der Kapitalwert-Berechnung für das Referenzlösungsprinzip „Reinigen mit Wasser“ (LR18) und das alternative Lösungsprinzip „Reinigen mit CO₂“ (L18) im Rahmen der Verfahrensumsetzung beim Unternehmen Alpha.

Tab. 44: Kapitalwerte der Referenzlösung „Reinigen mit Wasser“ (LR18) und des alternativen Lösungsprinzips „Reinigen mit CO₂“ (L18) des Unternehmens Alpha (Lebensdauer der Anlage beträgt 10 Jahre)

Reinigung mit Wasser					Erhebungs-kategorie	Annahmen
Lebenszyklus-phase	Ressource bzw. Untersuchungsgegenstand	Vorprodukt	Einheit	Menge	Kosten [€]	
Vorgelagerte Phase						
	Zubehör Reinigungsmaschine					
		Filtergehäuse	stk	1	410,00	
		Pumpe Umpumpwasser	stk	1	170,00	5400 l/h 1300 W
		Behälter UW	stk	1	100,00	
		Tauchheizkörper	stk	1		
	Herstellungsprozess					
		Kühlwasser	kg	4.000,00	14,32	1,7 €/m ³ Wasser; 1,88 €/m ³ Schmutzwasser
		Energie	kWh	2.000,00	220,00	0,11 €/kWh
		Σ Vorgelagerte Phase		€		914,32
Nutzung						
	Frischwasser		kg	60.882.056,00	598.517,44	WFI: 9,83 €/m ³
	Sterilluft		kg	177.390,00	117,15	lediglich Stromverbrauch: 1065 kWh
	Silikon		kg	1.579,60	84.698,15	53,62 €/kg
	Energie		kWh	1.476.060,00	162.366,60	0,11 €/kWh
	Wartung					Anzahl: 2 mal
		Edelstahl 1.4404	kg	25	94,00	3,76 €/kg

Reinigung mit Wasser					Erhebungs-kategorie	Annahmen
		Kühlwasser	kg	200	0,72	0,11 €/kWh
		Energie	kWh	200	22,00	0,11 €/kWh
	Σ Nutzung		€		845.816,06	
Nachgelagerte Phase						
Summe					846.730,38	
Kapitalwert [€]					714.141,63	Zinssatz: 5%

Reinigung mit CO2					Erhebungs-kategorie	Annahmen
Lebenszyklus-phase	Ressource bzw. Untersuchungsgegenstand	Vorprodukt	Einheit	Menge	Kosten [€]	
Vorgelagerte Phase						
	Zubehör Reinigungsmaschine					
			stk	1		
			stk	1		
		Hochdruckkompressor	stk	1	1.800,00	
	Herstellungsprozess					
		Kühlwasser	kg	4.000,00	14,32	1,7 €/m³ Wasser; 1,88 €/m³ Schmutzwasser
		Energie	kWh	2.000,00	220,00	0,11 €/kWh
Σ Vorgelagerte Phase		€			2.034,32	
Nutzung						
	CO2		kg	9.460.800,00		

Reinigung mit CO2					Erhebungs-kategorie	Annahmen
	Beschleunigungsgas		kg	361.650,00	669.052,50	1,85 €/kg
	Frischwasser		kg	55.188.000,00	542.540,49	WFI: 9,83 €/kg
	Sterilluft		kg	137.970,00	91,08	lediglich Stromverbrauch: 828 kWh
	Silikon		kg	1.579,60	84.698,15	53,62 €/kg
	Energie		kWh	876.000,00	96.360,00	0,11 €/kWh
	Wartung					Anzahl: 2 mal
		Edelstahl 1.4404	kg	25	94,00	3,76 €/kg
		Kühlwasser	kg	200	0,72	1,7 €/m³ Wasser; 1,88 €/m³ Schmutzwasser
		Energie	kWh	200	22,00	0,11 €/kWh
	Σ Nutzung		€		1.392.858,94	
Nachgelagerte Phase						
Summe					1.394.893,26	
Kapitalwert [€]					1.176.550,96	Zinssatz: 5 %

11 Literaturquellen

Abele, Eberhard; Anderl, Reiner; Birkhofer, Herbert; Rüttinger, Bruno (2008): EcoDesign. Von der Theorie in die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Akiyama, Kaneo (1994): Funktionenanalyse. Der Schlüssel zu erfolgreichen Produkten und Dienstleistungen. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie Japan-Service.

Alcalde Rasch, Alejandro (2000): Erfolgspotential Instandhaltung. Theoretische Untersuchung und Entwurf eines ganzheitlichen Instandhaltungsmanagements. Berlin: Erich Schmidt.

Alisch, Katrin (2004): Gabler-Wirtschaftslexikon. Die ganze Welt der Wirtschaft: Betriebswirtschaft, Volkswirtschaft, Recht, Steuern. 16., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Gabler.

Altschuller, G. S. (1973): Erfinden – (k)ein Problem? Anleitung für Neuerer und Erfinder. Berlin: Tribüne.

Anastas, P. T.; Zimmerman, J. B. (2007): Green Nanotechnology – Why We Need a Green Nano Award & How to Make it Happen, The Project on Emerging Nanotechnologies. „Woodrow Wilson Centre“, Center for Green Chemistry and Green Engineering, Yale University.

Angerer, Gerhard; Marscheider-Weidemann, Frank; Lüllmann, Arne; Erdmann, Lorenz; Scharp, Michael; Handke, Volker; Marwede, Max (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Schlussbericht.

Ardilio, A.; Laib, S. (2008): Technologiepotenzialanalyse. In: Bullinger, Hans-Jörg (Hg.): Fokus Technologie. Chancen erkennen – Leistungen entwickeln. München: Hanser, S. 175-217.

Atik, Alp (2001): Entscheidungsunterstützende Methoden für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung. Aachen: Shaker.

Bachmann, G.; Grimm, V.; Hoffknecht, A.; Luther, W.; Ploetz, C.; Reuscher, G. et al. (2007): Nanotechnologien für den Umweltschutz. Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH (Hg.). Düsseldorf.

Bannert, Marc (2007): Ein Verfahren zur Verbesserung der Innovativität von Unternehmen auf der Grundlage des komplexen Problemlösens. IPA-IAO Forschung und Praxis, 474. Heimsheim: Jost-Jetter-Verl.

Bardt, Hubertus (2008): Sichere Energie- und Rohstoffversorgung. IW-Positionen – Beiträge zur Ordnungspolitik aus dem Institut der deutschen Wirtschaft. Köln.

Baron, Ralf; Alberti, Klaus; Gerber, Jochen; Jochem, E.; Bradke, H.; Dreher, C. et al. (2005): Studie zur Konzeption eines Programms für die Steigerung der Materialeffizienz in Mittelständischen Unternehmen. Abschlussbericht. Herausgegeben von Arthur D. Little GmbH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.

Baron, Waldemar (2004): Innovations- und Technikanalyse. Chancen und Barrieren betrieblicher Integration. 2. Aufl. Frankfurt/Main: Campus.

Baron, Waldemar; Zweck, Axel (2001): Bedarf und Nutzen von ITA für die Wirtschaft. TA-Datenbank-Nachrichten, Nr. 2, 10. Jg., Juni 2001.

Bauer, C.; Buchgeister, J.; Hischier, R.; Poganietz, Witold-R; Schebeck, L.; Warsen, J. (2007): Towards a framework for life cycle thinking in the assessment of nanotechnology. In: Journal of Cleaner Production, S. 1-17.

BDI (2008): BDI-Mittelstandspanel, Ergebnisse der Online Mittelstandsbefragung. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI). Berlin

Becker, Martin; Denisow, Karin; Grau, Martin; Menrad, Wolfram; Rohwedder, Annegret (2002): Lebensdauerverlängerung von Investitionsgütern (Levin). Potentialanalyse und Transferkonzept. Stuttgart.

Behrendt, Siegfried; Erdmann, Lorenz (2010): Querschnittstechnologien – Innovationssprünge für Ressourceneffizienz. Eine Exploartionsstudie. IZT. Berlin.

Berns, Maurice; Townen, Andrew; Khayat, Zahyna; Balagopal, Balu; Reeves, Martin; Hopkins, Michael; Kruschwitz, Nina (2009): The Business of Sustainability: What it means to Managers now. In: MIT Sloan Management Review, Jg. Fall 2009, H. Vol. 51 No. 1, S. 20-26.

Beucker, Severin (2006): Ein Verfahren zur Bewertung von Lieferanten auf der Grundlage von Umweltwirkungen unter Berücksichtigung von Prozesskosten. IPA-IAO-Forschung und -Praxis, Nr. 429. Heimsheim: Jost-Jetter.

BGR (2010): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.

Bierter, Willy (2001): Zukunftsfähiges Systemdesign. für: "Jahrbuch Ökologie 2002". Institut für Produktdauer-Forschung & Factor 10 Innovation Network. Genf/Giebenach, Schweiz.

Birkhofer, Herbert (Hg.) (2000): Umweltgerechte Produktentwicklung. Ein Leitfaden für die Entwicklung und Konstruktion. Berlin: Beuth.

Bleischwitz, R.; Giljum, S.; Kuhndt, M.; Schmidt-Bleek, Friedrich (2009): Eco-innovation. putting the EU on the path to a resource and energy efficient economy. Wuppertal Spezial 38.

BMBF (2006): Die Hightech-Strategie für Deutschland. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Bonn, Berlin.

BMBF (2008): Masterplan Umwelttechnologien. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Bonn, Berlin.

BMBF (2010): Gebot der Stunde: Ressourcen schonen, Energieeffizienz drastisch steigern. Das verarbeitende Gewerbe in der Pflicht. Themenexposé für Medien, Stand: 26. Februar 2010. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Bonn, Berlin.

BMU (2006): Umwelt und Innovation: Leitmärkte der Zukunft. Dokumentation der Fachkonferenz am 30. Oktober 2006 in Berlin. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin.

BMU (2007): Strategie Ressourceneffizienz. Impulse für den Ökologischen und Ökonomischen Umbau der Industriegesellschaft. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin

BMU (2009a): Innovation durch CSR. Die Zukunft nachhaltig gestalten. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin.

BMU (2009b): Memorandum Product Carbon Footprint. Positionen zur Erfassung und Kommunikation des Product Carbon Footprint für die internationale Standardisierung und Harmonisierung. Langfassung. Herausgegeben von Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin

BMWi (2010): Forschung für Energieeffizienz. Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Berlin.

Brahmer-Lohss, Martin; Dräger, Hans-J; Gleich, Arnim von; Gößling-Reisemann, Stefan; Gottschick, Manuel; Grossmann, Dieter et al. (2004): Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg. Erkenntnisse – Erfahrungen – praktische Erfolge. Endbericht des BMBF-Projektes Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg,

Brand, Leif; Eickenbusch, Heinz; Hoffknecht, Andreas; Krauß, Oliver; Zweck, Axel; Pohle, Dirk (2007): Innovations- und Marktpotenzial neuer Werkstoffe. Monitoringbericht 2007.

- Brezet, H.; van Hemel (1997): Ecodesign – A promising approach to sustainable production and consumption. United Nations Environmental Program UNEP.
- Brockhoff, Klaus (1999): Forschung und Entwicklung. Planung und Kontrolle. 5., erg. und erw. Aufl. München: Oldenburg.
- Bullinger, H. -J (1995): Technologiemanagement. Eversheim, W.; Schuh, G.: Produktion und Management, Berlin: Springer-Verlag.
- Bullinger, H. J.; Richter, M.; Nohe, P.; Kröll, M. (2003): An approach to handle risk aspects by technology assessment. Proceedings of the 10th ISPE international conference on concurrent engineering: Research and applications. Madeira.
- Bullinger, H. J. (1994): Einführung in das Technologiemanagement. Modelle, Methoden, Praxisbeispiele. Stuttgart: Teubner.
- Bullinger, H. J. (Hg.) (2008): Fokus Technologie. Chancen erkennen – Leistungen entwickeln. München: Hanser.
- Bullinger, H. J.; Eversheim, W.; Haasis, H.-D. (2000): Auftragsabwicklung optimieren nach Umwelt- und Kostenzielen. OPUS – Organisationsmodelle und Informationssysteme für einen produktionsintegrierten Umweltschutz. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Bullinger, H. J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E. (2009): Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung, Umsetzung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Bullinger, H. J.; Warschat, Joachim (2007): Innovationsmanagement in Netzwerken. In: Garcia Sanz, Francisco J.; Semmler, Klaus; Walther, Johannes: Die Automobilindustrie auf dem Weg zur globalen Netzwerkkompetenz. Effiziente und flexible Supply Chains erfolgreich gestalten. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 199-215.
- BUND (2008): Zukunftsfähiges Deutschland in einer globalisierten Welt. Ein Anstoß zur gesellschaftlichen Debatte. 2. Aufl. Frankfurt am Main: Fischer-Taschenbuch-Verlag.
- Bünting, Frank (2009): Lebenszykluskostenbetrachtungen bei Investitionsgütern. In: Schweiger, Stefan (Hg.): Lebenszykluskosten optimieren. Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- Chang, Hsiang-Tang; Chen, Jahau Lewis (2004): The conflict-problem-solving CAD software integrating TRIZ into eco-innovation. Tainan.
- Charter, Martin; Tischner, Ursula (Hg.) (2001): Sustainable solutions. Developing products and services for the future. Sheffield: Greenleaf.
- Chen, Jahau Lewis; Liu, Chih-Chen (2003): An eco-innovative design approach incorporating the TRIZ method without contradiction analysis.
- Christiansen, K. (1997): Simplifying LCA. final report of working group. Herausgegeben von SETAC- Society of Environmental Tox. and Chemistry.
- Coenen, Reinhard; Grunwald, Armin (2003): Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland. Analyse und Lösungsstrategien. Berlin: Ed. Sigma.
- Cooper, Robert G (2001): Winning at new products. Accelerating the process from idea to launch. 3. ed. Cambridge, Mass.: Perseus.
- Cuhls, Kerstin; Ganz, Walther; Warnke, Philine (2009): Der BMBF-Foresight-Prozess. Etablierte Zukunftsfelder und ihre Zukunftsthemen. Karlsruhe, Stuttgart.
- Day, George S; Schoemaker, Paul J. H; Gunther, Robert E (2000): Wharton on managing emerging technologies. New York, NY: Wiley.
- Dewulf, Jo; van Langenhove, Herman (2005): Integrating industrial ecology principles into a set of environmental indicators for technology assessment. In: Resources, Conservation and Recycling, Jg. 43, S. 419-432.

- DIN (1996): DIN EN 1325-1:1996-11, 11, 1996: Value Management, Wertanalyse, Funktionsanalyse, Wörterbuch – Teil 1: Wertanalyse und Funktionsanalyse; Deutsche Fassung EN 1325-1:1996.
- DIN (1997): DIN EN ISO 14040, 1997-08-00: Umweltmanagement – Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen.
- DIN (2009a): DIN ISO 26000:2009-11, 2009: Leitfaden gesellschaftlicher Verantwortung.
- DIN (2009b): DIN EN 60034-30:2009, 2009: Drehende elektrische Maschinen – Teil 30: Wirkungsgrad-Klassifizierung von Drehstrommotoren mit Käfigläufern, ausgenommen polumschaltbare Motoren (IE-Code) (IEC 60034-30:2009); Deutsche Fassung.
- Dispan, Jürgen (2011): Greentech im Maschinen- und Anlagenbau Baden-Württembergs. Potenziale in den Zukunftsfeldern Energieeffizienz, Erneuerbare Energien, Elektromobilität. Informationsdienst des IMU-Instituts – Herft 1/2011.
- Eckardt, Sven (2007): Energie- und Umweltmanagement in Hotels und Gaststätten: Entwicklung eines Softwaretools zur systematischen Prozessanalyse und Managementunterstützung. Stuttgart.
- Ehrlenspiel, Klaus (2007): Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 3. aktualisierte Aufl. München: Hanser.
- Elkington, John (1998): Cannibals with forks. The triple bottom line of 21st century business. Gabriola Island BC, Stony Creek CT: New Society Publishers.
- Endres, Alfred; Querner, Immo (2000): Die Ökonomie natürlicher Ressourcen. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer.
- Erhardt, Reiner; Pastewski, Nico (2010): Ressourceneffizienz im produzierenden Gewerbe. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag
- Ernst & Young (Hg.) (2010): Krise als Chance für Veränderungen, Jg. Frühjahr 2010, Ausgabe 13.
- Europäischer Rat (1992): Richtlinie des Rates über die Angabe des Verbrauchs an Energie und anderen Ressourcen durch Haushaltsgeräte mittels einheitlicher Etiketten und Produktinformationen. 92/75/EWG, vom 22. September 1992.
- Europäische Kommission (2001): Grünbuch zur integrierten Produktpolitik. KOM (2001) 68 endgültig, Brüssel, vom 06.02.2001.
- Europäische Kommission (2005): Mitteilung der Kommission an den Rat, das europäische Parlament, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen – Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen. KOM(2005) 670 endgültig, Brüssel, vom 21.12.2005.
- Europäische Kommission (2006): Beschluss Nr. 1639/2006/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. Oktober 2006 zur Einrichtung eines Rahmenprogramms für Wettbewerbsfähigkeit und Innovation (2007-2013), vom 24.10.2006.
- Europäisches Parlament und Europäischer Rat (2009): Richtlinie 2009/125/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Neufassung), vom 21.10.2009.
- Eversheim, W.; Böhlke, U.; Martini, C.; Schmitz, W. (1993): Neue Technologien erfolgreich nutzen: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik – Teil 1. In: VDI-Z, H. 135(8), S. 78-81.
- Eversheim, W.; Pfeifer, T.; Weck, M.; Brecher, C.; Schmitt, R.; Schuh, G (Hg.) (2010): Ressourceneffiziente Produktionstechnik – Ein Aachener Modell. Aachen: Apprimus Verlag
- Eversheim, W.; Schuh, G. (1996): Hütte: Taschenbuch für Betriebsingenieure (Betriebsstätte), Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 7. neu bearbeitete Auflage, 1996

Faulstich, M.; Leipprand, A.; Mocker, M (2009): Perspektive Zukunftsfähigkeit -Steigerung der Rohstoff- und Materialeffizienz. Frankfurt am Main: KfW

Feifel, Silke (Hg.) (2009): Ökobilanzierung 2009 – Ansätze und Weiterentwicklungen zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit. Tagungsband Ökobilanz-Werkstatt 2009, Campus Weißenstephan, Freising, 5. bis 7. Oktober 2009. Karlsruhe: KIT Scientific Publ.

Foster, Richard N. (2006): Innovation. Die technologische Offensive. Sonderausg. Heidelberg: Redline Verlag.

Gassmann, Oliver; Kobe, Carmen (2006): Management von Innovation und Risiko. Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen. Springer-Verlag.

Gausemeier, Jürgen; Ebbesmeyer, Peter; Kallmeyer, Ferdinand (2001): Produktinnovation. Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. München: Hanser.

Gerpott, Torsten J (2005): Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Gerybadze, Alexander (2004): Technologie- und Innovationsmanagement. Strategie, Organisation und Implementierung. München: Vahlen.

Geschka, Horst (1995): Methoden der Technologiefrühaufklärung und der Technologievorhersage. In: Zahn, Erich O. K: Handbuch Technologiemanagement. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 623-644.

Gimpel, Bernd; Herb, Thilo; Herb, Rolf (2000): Ideen finden, Produkte entwickeln mit TRIZ. München: Hanser.

Gleich, Arnim von (2009): Green Nano – Nachhaltige Nanotechnologien. Möglichkeiten und Grenzen einer leitbildorientierten Gestaltung. Hintergrundpapier für einen Veranstaltungsblock im Rahmen der Zwischenbilanz der Nanokommission am 17. 2. 2010. Unter Mitarbeit von Catenhusen, Leuschner und Reihlen et al. Online verfügbar unter <http://www.oekopol.de/de/aktuell/nano/Material/Green%20nano%20-%20Hintergrundpapier.pdf>, zuletzt geprüft am 23.10.2010.

Goedkoop, Mark; Demmers, Marjolein; Collignon, Marcel (1995): The Eco indicator 95. Weighting method for environmental effects that damage ecosystems or human health on a european scale contains 100 indicators for important materials and processes manual for designers. Amersfoort: Novem.

Gomeringer, Axel (2007): Eine integrative, prognosebasierte Vorgehensweise zur strategischen Technologieplanung für Produkte. Stuttgart.

Götze, Uwe (2006): Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 5., überarb. Aufl. Berlin: Springer-Verlag.

Grothe, Claus (2006): Die Integration des Eco-Design Prinzips bei der Entwicklung komplexer Produkte unter Einbeziehung ökonomischer Aspekte. Coventry.

Grunwald, Armin (2002a): Technikfolgenabschätzung – eine Einführung. Gesellschaft – Technik – Umwelt, N.F., 1. Berlin: Ed. Sigma

Grunwald, Armin (2002b): Technikgestaltung für eine nachhaltige Entwicklung. Von der Konzeption zur Umsetzung. Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland, 4. Berlin: Ed. Sigma.

Hartel, Marko, Spath, Dieter (1994): Oko-Portfolio: Methode zu Beurteilung der Recyclingeignung technischer Serienprodukte. In: VDI Berichte Nr. 1171, 1994. Karlsruhe, S. 371-392.

Hauschildt, Jürgen (2004): Innovationsmanagement. 3., völlig überarb. und erw. Aufl. Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Vahlen

Herb, Rolf; Herb, Thilo; Kohnhauser, Veit (2000): TRIZ. Der systematische Weg zur Innovation ; Werkzeuge, Praxisbeispiele, Schritt-für-Schritt-Anleitungen. Landsberg/Lech: mi Verlag Moderne Industrie.

Herb, Rolf; Terninko, John; Zusman, Alla; Zlotin, Boris (1998): TRIZ – der Weg zum konkurrenzlösen Erfolgsprodukt. Ideen produzieren, Nischen besetzen, Märkte gewinnen. Landsberg/Lech: Verlag. Moderne Industrie.

Hermenau, Udo (2008): EcoDesign Implementierung in die Produktentstehungspraxis. Ein entscheidungsorientierter Ansatz. Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik" Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. E. Abele. Darmstadt

Herrmann, Christoph (2010): Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Herstatt, Cornelius; Verworn, Birgit (Hg.) (2007): Management der frühen Innovationsphasen. Grundlagen – Methoden – Neue Ansätze. Wiesbaden: Gabler Verlag.

Heubach, Daniel (2008): Eine funktionsbasierte Analyse der Technologierelevanz von Nanotechnologie in der Produktplanung. Stuttgart.

Hinterhuber, Hans Hartmann (1982): Wettbewerbsstrategie. Berlin: de Gruyter.

Hirth, Thomas; Woidasky, Jörg; Eyerer, Peter (2007): Nachhaltige rohstoffnahe Produktion. Abschlußbericht des Vorhabens "Analyse, Bewertung und Dokumentation von Forschungsschwerpunkten für den Themenbereich Nachhaltig wirtschaften in rohstoffnahen Produktionssystemen" im Rahmenprogramm "Forschung für Nachhaltigkeit" des BMBF. Pfinztal: Fraunhofer-IRB-Verlag.

HWWI (2008): Rohstoffpreise 2008. HWWI Policy Report Nr. 8 des HWWI-Kompetenzbereiches Wirtschaftliche Trends.

IEA (2006): International Energy Agency 2006: Energy Technology Perspectives, Scenarios and strategies to 2050. Paris.

Jochem, E.; Alberti, K.; Kristof, K. (2005): Studie zur Konzeption eines Programms für die Steigerung der Materialeffizienz in mittelständischen Unternehmen. Anlagenband zur Potential- und Hemmnis-Analyse.

Jörissen, J.; Schippl, J.; Dieckhoff, C.; Gronwald, N.; Grunwald, A.; Hartlieb, N. et al. (2008): Roadmap Umwelttechnologien 2020. Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7425. Herausgegeben von ITAS – Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. Karlsruhe.

Kano, N.; Seraku, N.; Takahashi, F.; Tsuji S. (1984): Attractive Quality and Must-be Quality. In: Journal of the Japanese Society for Quality Control, H. 14(2), S. 39-48.

Klein, Bernd (2007): TRIZ/TIPS – Methodik des erfinderischen Problemlösens. 2., verb. und erw. Aufl. München: Oldenburg.

Kleinschmidt, Elko J; Geschka, Horst; Cooper, Robert G (1996): Erfolgsfaktor Markt. Kundenorientierte Produktinnovation. Berlin: Springer-Verlag.

Kobe, C. (2001): Integration der Technologiebeobachtung in die Frühphase von Innovationsprojekten. St. Gallen.

Kreibich, Rolf (2010): Die Rolle wissenschaftlicher Zukunftsforschung für Nachhaltigkeitsstrategien in Unternehmen. Arbeitsbericht Nr. 36/2010.

Kristof Kora (2007): Hot Spots und zentrale Ansatzpunkte zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Steigerung der Ressourcenproduktivität als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung – Projekt im Auftrag des BMBF. Wuppertal.

- Kröll, Markus (2007): Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung. IPA-IAO Forschung und Praxis, 468. Heimsheim: Jost-Jetter-Verlag.
- Krüger, W. (1992): Organisationsmethodik. In: Frese, E.: Handwörterbuch der Organisation. Stuttgart: C. E. Poeschel.
- Lang-Koetz, Claus (2006): Ein Vorgehensmodell zur Einführung eines integrativen Umweltcontrollings auf Basis eines ERP-Systems. Stuttgart.
- Lang-Koetz, Claus; Ardilio, Antonino; Warschat, Joachim (2008): TechnologieRadar – Heute schon Technologien für morgen identifizieren. In: Bullinger, Hans-Jörg (Hg.): Fokus Technologie. Chancen erkennen – Leistungen entwickeln. München: Hanser, S. 133-146.
- Lang-Koetz, Claus; Heubach, Daniel; Beucker, Severin (2006): Abschätzungen von Umweltwirkungen in frühen Phasen des Produktinnovationsprozesses. In: Pfriem, Reinhard; Antes, Ralf; Fichter, Klaus; Müller, Martin; Paech, Niko; Seuring, Stefan; Siebenhüner, Bernd: Innovationen für eine nachhaltige Entwicklung. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, S. 417–431.
- Lang-Koetz, Claus; Pastewski, Nico; Rohn, Holger (2010): Identifying new technologies, products and strategies for resource efficiency. In: Chemical Engineering and Technology, Jg. 33, H. 4, S. 559–566.
- Leemhuis, Helen (2005): Funktionsgetriebene Konstruktion als Grundlage verbesserter Produktentwicklung. Dissertation. Berlin.
- Lentes, H. P.; Richter, M. (2004): Systematische Technologiebewertung zur Absicherung der Produktentwicklung. In: Spath, Dieter (Hg.): Forschungs- und Technologiemanagement. Potenziale nutzen – Zukunft gestalten. München: Hanser, S. 221-226.
- Lenzen, M.; Murray, J.; Sack, F.; Wiedmann, T. (2007): Shared producer and consumer responsibility – Theory and practice. In: Ecological Economics, Jg. 61, H. 1, S. 27-42.
- Lichtenthaler, Eckhard Rainer Volker (2002): Organisation der Technology Intelligence. Eine empirische Untersuchung der Technologiefrühaufklärung in technologieintensiven Grossunternehmen. Zürich: Verlag Industrielle Organisation.
- Lindow, K.; Weinert, N.; Stark, R.; Seliger G. (2009): Scenario-based approach to the holistic development of sustainable products.
- Löffler, Frank (1997): Entwicklungsbegleitende Risikobehandlung neuer Technologien. Am Beispiel der Physical-vapour-deposition-(PVD)-Technologie. Techn. Hochsch., Habil.-Schrift–Aachen, 1996. Werkstoffwissenschaftliche Schriftenreihe 17. Aachen: Mainz.
- Lovins, Hunter (2008): Rethinking Production. In WorldWatch Insitute, State of the Worls 2008: innovations for a sustainable economy. Online verfügbar unter www.worldwatch.org.
- Lukas, Rainer; Röhr, Anja; Scharp, Michael (2007): Das Rohstoff System Kupfer – Status Quo, Perspektiven und Handlungsbedarf aus Sicht einer nachhaltigen Ressourcenpolitik. im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- Lust, K. H. (2008): Zukunftsfeld Werkstofftechnologien. 13. Sitzung, 24. Juni 2008. Unter Mitarbeit von Holger Hanselka und Ursula Eul. Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile.
- Mahammadzadeh, Mahammad (2006): Forschungs- und praxisrelevante Themen und Herausforderungen im Kontext des betrieblichen Umweltmanagements. In: Nick, Lin-Hi; Mahammad, Mahammadzadeh (Hg.): Dimensionen und Herausforderungen der Nachhaltigkeit. Meeting the Future. Nachwuchsforschung zum Nachhaltigen Wirtschaften. Leipzig, Köln.
- Mappus, Stefan; Fussler, Claude (2005): Erde 2.0. Technologische Innovationen als Chance für eine nachhaltige Entwicklung? Berlin: Springer-Verlag.
- McDonough, William J; Braungart, Michael (2002): Cradle to cradle. Remaking the way we make things. 1. ed. New York, NY: North Point Press.

Meadows, Donella H.; Randers, Jorgen; Meadows, Dennis L. (2004): Limits to growth. The 30-year update. 1. printing. White River Junction, Vt.: Chelsea Green Publ. Company.

Meadows Donatella H.; et al. (1972): The Limits to Growth. New York: Universe Books

Metzner, Martin (2008): Selbstheilende Oberflächen. MaterialNews vom 04.08.2009. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung. Online verfügbar unter <http://www.materialsgate.de/mnews/4639/Selbstheilende+Oberfl%C3%A4chen.html>, zuletzt geprüft am 20.11.2010.

Mild, Thomas (2002): Bewertung technologischer Ressourcen. Erarbeitung einer systematischen methodengestützten Vorgehensweise zur Beschleunigung von Managemententscheidungen im Rahmen von Entwicklungsvorhaben. Aachen: Shaker.

Mocker, M.; Köglmeier, M.; Leipprand, M.; Faulstich, M. (2010): Perspektiven für eine resouceneffiziente Industriegesellschaft. In: Teipel, Ulrich (Hg.): Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen: Fraunhofer Verlag, S. 9-33.

Möhrle, Martin G; Isenmann, Ralf (Hg.) (2005): Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. 2., wesentlich erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Neugebauer, R.; Westkämper, E.; Klocke, F.; Kuhn, A.; Schenk, M.; Michaelis, A. et al. (2008): Energieeffizienz in der Produktion. Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf. München.

Nyhuis, Peter; Reinhart, Gunther; Abele, Eberhard (2008): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen, Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek.

Oberender, Christof (2006): Die Nutzungsphase und ihre Bedeutung für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. Techn. Univ., Diss.--Darmstadt, 2006. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl.

Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-H (2005): PahlBeitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Pastewski, Nico (2009): Einsatz neuer Technologien zur ressourceneffizienzorientierten Produktoptimierung. In: Feifel, S.: Ökobilanzierung 2009. Ansätze und Weiterentwicklungen zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit: Tagungsband der fünften Ökobilanz-Werkstatt, Campus Weihenstephan, Freising, 5. bis 7. Oktober 2009. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2009, pp. 185-192

Pastewski, Nico; Lang-Koetz, Claus; Heubach, Daniel; Haas, Karl-Heinz (2009): Materialeffizienz durch Nanotechnologien und neue Materialien. 14 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Wiesbaden.

Patzak, Gerold (1982): Systemtechnik – Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin: Springer-Verlag.

Penrose, Edith Tilton (1995): The theory of the growth of the firm. 3. ed., [Nachdr.]/. Oxford: Oxford Univ. Press.

Pfeiffer, Werner; Metze, Gerhard; Schneider, Walter; Amler, Robert (1991): Technologie-Portfolio zum Management strategischer Zukunftgeschäftsfelder. 6., durchges. Aufl. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.

Pfeiffer, W.; Weiß, E. (1995): Methoden zur Analyse und Bewertung technologischer Alternativen. In: Zahn, Erich O. K: Handbuch Technologiemanagement. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 663-679.

- Porter, Michael E (1999): Wettbewerbsstrategie (competitive strategy). Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten. 10., durchges. und erw. Aufl. Frankfurt: Campus-Verlag.
- Raether, F. (2006): Jahresbericht Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC). Würzburg.
- Rebitzera, G.; Ekvallb, T.; Frischknecht, R.; Hunkeler, D.; Norriss, G.; Rydberg, T. et al. (2003): Life cycle assessment. Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications.
- Reid, Alasdair; Miedzinski, Michael (2008): Eco-Innovation. Final report for sectoral innovation watch. Herausgegeben von Europe Innova technopolis-group.
- Reuscher, Günter; Ploetz, Christiane Grimm Vera; Zweck, Axel (2008): Innovationen gegen Rohstoffknappheit. Herausgegeben von VDI-Technologiezentrum GmbH. Düsseldorf.
- Ritthoff, Michael; Rohn, Holger; Liedtke, Christa (2002): MIPS berechnen. Ressourcenduktivität von Produkten und Dienstleistungen. Wuppertal: Wuppertal-Inst. für Klima Umwelt Energie. Wuppertal spezial 27.
- Rohn, Holger; Lang-Koetz, Claus; Pastewski, Nico; Lettenmeier, Michael (2008): Ressourceneffizienzpotenziale durch Technologien, Produkte und Strategien. Erste Ergebnisse. Ressourceneffizienz Paper 1.1.
- Rohn, Holger; Lettenmeier, Michael; Liedtke, Christa; Schmidt-Bleek, Friedrich B. (2009): Resource productivity in 7 steps. How develop eco-innovative products and services and improve their material footprint. Wuppertal Spezial 41.
- Rohn, Holger; Pastewski, Nico; Lettenmeier, Michael; et. al (2010): Ressourceneffizienz von ausgewählten Technologien, Produkten und Strategien – Ergebniszusammenfassung der Potenzialanalysen. Ressourceneffizienz Paper 1.4.
- Roland Berger (2007): Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes Förderkennzahl (UFOPLAN) 206 14 132/04. Langfassung.
- Ropohl, Günter (1979): Eine Systemtheorie der Technik. Zur Grundlegung der allgemeinen Technologie. München: Hanser.
- Rosenau-Tornow, Dirk; Buchholz, Peter Riemann Axel; Wagner, Markus (2009): Assessing the long-term supply risks for mineral raw material – a combined evaluation of past and future trends. In: Resources Policy, Jg. 34, S. 161-175.
- Ruud, Audun; Larsen, Olav Mosvold (2003): How can Eco-design be used as a guiding tool towards the diffusion of sustainable product innovations? Some empirical findings from the ConEcol project. Innovation for Sustainability, 11th International Conference of the Greening of Industry Network, October 12-15, 2003, San Francisco.
- Schaltegger, S.; Sturm, A. (1990): Ökologische Rationalität- Ansatzpunkte zur Ausgestaltung von ökologieorientierten Managementinstrumenten. In: Die Unternehmung, J. 44, Nr. 4, S. 273-290.
- Schaltegger, Stefan (2004): Nachhaltigkeitsmanagement in Unternehmen. Konzepte und Instrumente zur nachhaltigen Unternehmensentwicklung. Köln: TÜV-Verl.
- Schaltegger, Stefan; Burritt, Roger (2000): Contemporary environmental accounting. Issues, concepts and practice. Sheffield: Greenleaf.
- Schäppi, Bernd; Schäppi-Andreasen-Kirchgeorg-Radermacher (Hg.) (2005): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser.
- Schimmelpfeng, Lutz (1999): Ökologische Produktgestaltung. Stoffstromanalysen und Ökobilanzen als Instrumente der Beurteilung, Ergebnisse der Fachtagung, die im Oktober 1998 veranstaltet wurde. Berlin: Springer-Verlag.

- Schimpf, S.; Mezger, J.; Kotic, J. (2000): Einsatz von operativen Umweltmanagementsystemen. In: Birkhofer, Herbert (Hg.): Umweltgerechte Produktentwicklung. Ein Leitfaden für die Entwicklung und Konstruktion. Berlin: Beuth, S. Kap. 2.3.3; S. 1-7.
- Schippel, J.; Grunwald, A.; Hartlieb, N.; Jörissen, J.; Mielicke, U.; Parodi, O.; Stelzer, V.; Weinberger, N.; Dieckhoff, C. (2009): Roadmap Umwelttechnologien 2020 - Endbericht. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe.
- Schippel, J.; Jörissen, J. (2010): Foresight für die Umwelttechnik von morgen. In: Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis, Jg. 19, H. 1, S. 4-12.
- Schmidt-Bleek, Friedrich (1997): Wieviel Umwelt braucht der Mensch? Faktor 10 – das Mass für ökologisches Wirtschaften. Im Text ungekürzte Ausg. München: Dt. Taschenbuch-Verlag.
- Schmidt-Bleek, Friedrich B. (1998): Das MIPS-Konzept. Weniger Naturverbrauch – mehr Lebensqualität durch Faktor 10. München: Droemer Knauer.
- Schuh, G.; Martini C.; Böhlke U.; Schmitz W. (1992): Planung technologischer Innovationen mit einem Technologiekalender. In: io Management Zeitschrift, H. 61(3), S. 31-35.
- Schumpeter, J. (1964): Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. 4. Aufl. Duncker & Humblot.
- Schütz, Helmut; Bringezu, Stefan (2008): Ressourcenverbrauch von Deutschland – aktuelle Kennzahlen und Begriffsbestimmungen. Erstellung eines Glossars zum „Ressourcenbegriff“ und Berechnung von fehlenden Kennzahlen des Ressourcenverbrauchs für die weitere politische Analyse. Forschungsbericht 363 01 134; UBA-FB 001103.
- Seliger, Günther (2007): Sustainability in manufacturing. Recovery of resources in product and material cycles. Berlin: Springer-Verlag.
- Servatius, Hans-Gerd (1985): Methodik des strategischen Technologie-Managements – Grundlage für erfolgreiche Innovationen. Dissertation. (2. Aufl. 1986). Berlin: Erich Schmidt-Verlag.
- Spath, Dieter (2008): Organisatorische Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen. Unternehmenserfahrungen, Forschungs- und Transferbedarfe. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Spath, Dieter; Beucker, Severin Lang Claus (2003): Integrating Environmental Impact and Cost Assessment into Business Processes. CIRP seminar on life cycle engineering, Department of Manufacturing Engineering Management, Technical University of Denmark. Kopenhagen.
- Spath, Dieter; Dill, Christoph; Scharer, Michael (2001): Vom Markt zum Markt. Produktentstehung als zyklischer Prozess. Stuttgart: LOGIS-Verlag.
- Spath, Dieter; Warschat, Joachim (2008): Innovation durch neue Technologien. In: Bullinger, Hans-Jörg (Hg.): Fokus Technologie. Chancen erkennen – Leistungen entwickeln. München: Hanser, S. 1-12.
- Specht, Dieter; Möhrle, Martin G. (2002): Gabler Lexikon Technologiemanagement. Management von Innovationen und neuen Technologien im Unternehmen. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- Spur, Günter (1998): Technologie und Management. Zum Selbstverständnis der Technikwissenschaften. München: Hanser.
- Stachowiak, Herbert (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer-Verlag.
- Stark, Rainer; Lindow, Kai; Woll, Rober; Kind, Christian (2008): Beitrag der Produktentstehung zur Nachhaltigkeit. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik.

Statistisches Bundesamt (2010): Produzierendes Gewerbe – Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Erden und Steinen. versch. Jahrgänge. Fachserie 4 Reihe 4.3. Wiesbaden.

Steinfeld, Michael; von Gleich Armin (2010): Entlastungseffekte für die Umwelt durch nanotechnische Verfahren und Produkte. Herausgegeben von Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Strigl, Alfred W. (2000): Nachhaltige Produktentwicklung. Möglichkeiten zur Neugestaltung des Produkt- und Technikentwicklungsprozesses durch leitbildorientierte Innovationsstrategien für eine Nachhaltige Entwicklung. 1. Teil Zwischenbericht. Herausgegeben von Österreichisches Institut für Nachhaltige Entwicklung. Wien.

Tahir, C.; Darton, R. (2010): The Process Analysis Method of selecting indicators to quantify the sustainability performance of a business operation. In: Journal of Cleaner Production.

Tischner, Ursula (2001): Tools for Ecodesign and Sustainable Product Design. In: Charter, Martin; Tischner, Ursula (Hg.): Sustainable solutions. Developing products and services for the future. Sheffield: Greenleaf, S. 263-280.

Tschirky, Hugo; Koruna, Stefan (1998): Technologie-Management. Idee und Praxis. Zürich: Orell Füssli Verl. Industrielle Organisation.

UBA (2009): Energiebetriebene-Produkte-Richtlinie / Ökodesign-Richtlinie (2005/32/EG) Übersicht über den Stand der Prozesse zur Verabschiedung von Durchführungsmaßnahmen Stand 20. November 2009. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/produkte/oekodesign/EbP-Aktuell.htm>, zuletzt geprüft am 20.11.2010.

Umschneider, M. (2006): Life Cycle Costing (LCC) und Life Cycle Assessment (LCA) – eine Übersicht bestehender Konzepte und deren Anwendung am Beispiel von Abwasserpumpstationen. Herausgegeben von E. Günther, G. Will und H. Hoppe. Dresden.

Ulrich, Karl T; Eppinger, Steven D (2008): Product design and development. 4. ed., internat. ed. Boston: McGraw-Hill/Irwin.

Unruh, Gregory; Ettenson, Richard (2010): Growing Green. Three smart paths to developing sustainable products. Harvard Business Review.

Untiedt, Dirk Bernward Josef (2009): Technologie Rating. Modell zur Bewertung der technologischen Leistungsfähigkeit produzierender Unternehmen. Aachen: Apprimus-Verl.

VDI (1993): VDI-Richtlinie 2221, 1993. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth Verlag GmbH, Berlin

VDI (1996): VDI-Richtlinie 2803, 1996. Blatt 1: Funktionsanalyse – Grundlagen und Methode. Beuth Verlag GmbH, Berlin

VDI (1997): VDI-Richtlinie 4600, 1997: Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI (1997): VDI-Richtlinie 2222 Blatt 1: Konstruktionsmethodik – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Beuth Verlag GmbH, Berlin

VDI (2000): Recyclingorientierte Entwicklung technischer Produkte 2000. VDI Berichte 1570. Fellbach. Beuth Verlag GmbH, Berlin

VDI (2000): Technikbewertung. VDI 3780. Beuth Verlag GmbH, Berlin

VDI (2007): Innovations- und Marktpotenzial neuer Werkstoffe. Monitoringbericht 2007. Unter Mitarbeit von Heinz Eickenbusch Andreas Hoffknecht Oliver Krauß Axel Zweck Dirk Pohle Leif Brand.

VDI (2008): Innovationen gegen Rohstoffknappheit. Unter Mitarbeit von Günter Reuscher, Christiane Grimm Vera Ploetz und Axel Zweck. Herausgegeben von VDI-Technologiezentrum GmbH.

VDMA (2006): VDMA Einheitsblatt 34 160:2006, Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen.

VDMA; Roland Berger (2009): Der Beitrag des Maschinen- und Anlagenbaus zur Energieeffizienz. Ergebnisse der Studie vom Oktober 2009.

VHK (2005): MEEUP- Methodology Study Eco-design of Energy-using Products. Final Report of Van Holsteijn en Kemna BV (VHK) for European Commission. Brussels.

Vossler, C. (2006): Nachhaltiges Wirtschaften und Technologieauswahl. Integrationsmöglichkeiten in der betrieblichen Praxis. Berlin: Wissenschaftlicher Verlag Berlin.

Wallentowitz, Henning; Freialdenhoven, Arndt; Olschewski, Ingo (2009): Strategien in der Automobilindustrie. Technologietrends und Marktentwicklungen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

WBCSD (2000): Measuring Eco-Efficiency: A Guide to Reporting Company Performance. Genf.

WBGU (1999): Welt im Wandel: Umwelt und Ethik. Sondergutachten 1999. Herausgegeben von Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU). Online verfügbar unter http://www.wbgu.de/wbgu_sn1999.pdf, zuletzt aktualisiert am 20.12.1999, zuletzt geprüft am 13.08.2008.

WCED (1987): Our Common Future (Brundtland Report). Herausgegeben von World Commission for Environment and Development (WCED).

Weizsäcker, Ernst Ulrich von; Lovins, Amory B; Lovins, L Hunter (1997): Faktor vier. Doppelter Wohlstand – halbiertes [Natur]verbrauch ; der neue Bericht an den Club of Rome. Vollst. Taschenbuchausg. München: Droemer Knauer.

Westkämper, Engelbert (1999): Entwicklung und Optimierung der Strukturen in der industriellen Produktion. In: VDI (Hg.): Innovation in Struktur und Methode der Produktion. 12. Jahrestagung Produktionslogistik. Tagung Frankfurt, 1. September 1999: VDI-Verlag.

Wiendahl, Hans-Peter (2008): Betriebsorganisation für Ingenieure. Mit 2 Tabellen. 6., aktualisierte Aufl. München: Hanser.

Willmann, Christian (2002): Recycling Leitfaden für Produktentwickler. Diplomarbeit an der TU Darmstadt. Darmstadt.

Wilms, Falko E. P (2006): Szenariotechnik. Vom Umgang mit der Zukunft. 1. Aufl. Bern: Haupt Verlag.

Wimmer, W. Züst R. (2001): ECODESIGN Pilot. Product Investigation, Learning and Optimization Tool for Sustainable Product Development. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publisher.

Wimmer, W. Züst R. Lee K. -M (2004): ECODESIGN Implementation. A Systematic Guide on Integrating Environmental Considerations into Product Development. Dordrecht: Springer-Verlag.

Wöhe, Günter; Döring, Ulrich (2002): Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 21. Aufl. München: Vahlen.

Wolfrum, Bernd (1991): Strategisches Technologiemanagement. Univ., Diss.--Bayreuth, 1990. Wiesbaden: Gabler (Neue betriebswirtschaftliche Forschung, 77).

Wübberhorst, Klaus L (1984): Konzept der Lebenszykluskosten. Grundlagen, Problemstellungen und technologische Zusammenhänge. TH, Diss.--Darmstadt, 1984. Darmstadt: Verlag für Fachliteratur (Reihe Betriebswirtschaft, 7=12).

Wuppertal Institut (2003): MIT-Wertetabelle: Materialintensität von Materialien und Energieträgern im Überblick. Verson 2.

Zahn, Erich O. K (1995): Handbuch Technologiemanagement. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Zehbold, Cornelia (1996): Lebenszykluskostenrechnung. Nürnberg, Univ., Diss.--Erlangen, 1995. Wiesbaden: Gabler (krp-Edition).

Zetkin, M.; Schaldach, K. (2005): Lexikon der Medizin. Sonderausg. 16., neu bearb. Aufl. Köln: Fackelträger-Verl.

Ziemann, S.; Schippel, J.; Grunwald, A.; Schebeck, L. (2010): Verfügbarkeit knapper metallischer Rohstoffe und innovative Möglichkeiten zu ihrer Substitution. In: Teipel, Ulrich (Hg.): Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen: Fraunhofer Verlag, S. 83-97.

