





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für  
Betriebswissenschaften und Montagetechnik  
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**Bewertung der Ressourceneffizienz  
in der Fertigung**

**Saskia Katrin Christina Reinhardt**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger  
(Technische Universität Berlin)

Die Dissertation wurde am 03.01.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 15.05.2013 angenommen.



Saskia Reinhardt

**Bewertung der Ressourceneffizienz  
in der Fertigung**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 278

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2014

ISBN 978-3-8316-4317-2

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*





## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger, dem Leiter des Fachgebiets Montagetechnik und Fabrikbetrieb am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts bedanken, die mich während meiner Zeit am Institut begleitet und bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Besonders danke ich Tobias Föckerer sowie Fabian Distel für die vielen fachlichen Anregungen und die konstruktiven Diskussionen, in denen ich zahlreiche Ideen entwickeln konnte. Ihnen, Hendrik Schellmann, Markus Graßl, Stephanie Holzer und meinem Bruder Maximilian Reinhardt gilt mein Dank für die kritische Durchsicht meiner Arbeit und die vielen konstruktiven Ratschläge. Bei Christian Patschke möchte ich mich herzlich für die Beratung hinsichtlich der mathematischen Modellierung bedanken. Außerdem danke ich allen Studenten, insbesondere Maria Fischl und Fabian Distel, die mich im Rahmen ihrer Studienarbeiten bei der Ausarbeitung und Umsetzung meiner Methode unterstützt haben.

Schließlich möchte ich mich ganz besonders bei meiner Familie und Tobias Föckerer für ihre Unterstützung bedanken. Insbesondere meine Mutter hat mir in allen Lebenslagen immer neue Blickwinkel eröffnet, die Faszination für komplexe Themen in mir geweckt und damit wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen.

München, im August 2013

*Saskia Reinhardt*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>i</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>ix</b>
Kleine und große altdeutsche Buchstaben.....	ix
Kleine und große griechische Buchstaben .....	ix
Kleine und große lateinische Buchstaben.....	x
Indizes und Indexmengen.....	xiii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Thematische Einordnung.....	4
1.2.1 Allgemeines.....	4
1.2.2 Ressourcen .....	4
1.2.3 Aspekte der Fertigungsgestaltung .....	8
1.3 Zielsetzung .....	12
1.3.1 Ziel der Arbeit .....	12
1.3.2 Eingrenzung des Betrachtungsraums .....	13
1.4 Aufbau der Arbeit .....	14
<b>2 Stand der Erkenntnisse</b>	<b>17</b>
2.1 Allgemeines .....	17
2.2 Methodische Grundlagen der Ökobilanzierung .....	17
2.2.1 Phasen einer Ökobilanz .....	17
2.2.2 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens ....	19
2.2.3 Sachbilanzierung .....	24
2.2.4 Wirkungsabschätzung .....	28
2.2.5 Auswertung.....	36
2.3 Ansätze zur Ökobilanzierung in der Fertigung .....	37
2.3.1 Untergliederung der bisherigen Arbeiten.....	37
2.3.2 Verfahrensspezifische Sach- und Ökobilanzen.....	37
2.3.3 Verfahrensübergreifende Modellierung und Bewertung ..	41
2.4 Zusammenfassende Analyse und Handlungsbedarf.....	46
<b>3 Ansatz zur Bewertung der Ressourceneffizienz</b>	<b>49</b>
3.1 Allgemeines .....	49
3.2 Anforderungen .....	49

3.3	Ressourcenströme einer Fertigungsprozesskette .....	51
3.3.1	Betrachtung der direkten Ressourcenströme.....	51
3.3.2	Erweiterte Betrachtung der Ressourcenströme .....	54
3.4	Konzeption der Bewertungsmethode .....	55
3.4.1	Allgemeines.....	55
3.4.2	Ökobilanzierung im Rahmen der Fertigungsgestaltung ..	56
3.4.3	Phasen der Ressourceneffizienz-Bewertung in der Fer- tigung .....	58
3.4.4	Kennzahlen zur Ressourceneffizienz-Bewertung in der Fertigung .....	61
<b>4</b>	<b>Modellierung von Ressourcenströmen</b>	<b>65</b>
4.1	Allgemeines .....	65
4.2	Generische Modellierung von Fertigungsprozessketten.....	65
4.2.1	Grundlagen der Modellierung .....	65
4.2.2	Ressourcenstromorientiertes Systemmodell .....	66
4.3	Modell zur Quantifizierung von Ressourcenströmen .....	79
4.3.1	Grundlagen der Modellierung .....	79
4.3.2	Prozessschritte und Arbeitszeiten .....	81
4.3.3	Modellierung der Brutto-Ressourcenströme .....	87
4.3.4	Modellierung der Reuse-Ressourcenströme .....	96
4.3.5	Berechnung der Netto-Ressourcenströme .....	99
4.3.6	Modellierung der Produkt-Ressourcenströme.....	100
4.4	Modellierungsprinzipien für den Alternativenvergleich .....	103
<b>5</b>	<b>Charakterisierung von Ressourcen</b>	<b>105</b>
5.1	Allgemeines .....	105
5.2	Beschreibung der Bewertungsaufgabe .....	105
5.2.1	Allgemeines.....	105
5.2.2	Bewertungsgrundlage .....	106
5.2.3	Bewertungsverfahren .....	106
5.2.4	Bestandteile des Bewertungsvorgehens.....	108
5.3	Identifikation der Ressourceneffizienz-Kriterien .....	108
5.3.1	Ableitung der Kriterienhierarchie .....	108
5.3.2	Operationalisierung der Kriterien .....	114
5.4	Bestimmung der charakteristischen Ressourcenfaktoren.....	116
5.4.1	Anforderungen und Ableitung des methodischen The- menfelds .....	116
5.4.2	Überblick über das Vorgehen .....	118
5.4.3	Gewichtung der Kriterien (Artenpräferenz) .....	119
5.4.4	Bewertung der Ressourcen (Höhenpräferenz) und Er- mittlung des Ressourcenfaktors.....	122

5.5	Prinzipien der Anwendung .....	124
5.5.1	Schritte bei der Anwendung des Vorgehens .....	124
5.5.2	Zuweisung der Ausprägungen .....	126
<b>6</b>	<b>Anwendung der Ressourceneffizienz-Bewertung</b>	<b>129</b>
6.1	Allgemeines .....	129
6.2	Umsetzung in dem Softwaretool <i>REvalue</i> .....	129
6.3	Exemplarische Anwendung in der Fügetechnik .....	131
6.3.1	Produktfeatures und Prozessketten .....	131
6.3.2	Modellierung und Quantifizierung .....	133
6.3.3	Bestimmung der Ressourcenfaktoren .....	145
6.3.4	Bewertung der Ressourceneffizienz .....	148
6.4	Bewertung der Methode .....	150
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>155</b>
7.1	Zusammenfassung .....	155
7.2	Ausblick .....	157
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>
	<b>Verzeichnis betreuter Studienarbeiten</b>	<b>181</b>
<b>A</b>	<b>Analyse der MADM-Verfahren</b>	<b>183</b>
<b>B</b>	<b>Ausführungen zur exemplarischen Anwendung</b>	<b>189</b>
B.1	Messungen .....	189
B.2	Globale Kriteriengewichte .....	190
B.3	Ausprägungen der Ressourcen .....	192



## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
A	Analyse
AB	b-Achse
AD	Axiomatic Design
AG	Aktiengesellschaft
AHP	Analytic Hierarchy Process
AL	Aluminiumlegierung EN AW 6060
al.	alii
Äqu.	Äquivalent
AX	x-Achse
AY	y-Achse
AZ	z-Achse
BEAT	Bewertung der Energieeffizienz alternativer Prozesse und Technologieketten
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMJ	Bundesministerium der Justiz
bzw.	beziehungsweise
CI	Consistency Index
CLP	Classification, Labelling and Packaging of Substances and Mixtures
CML	Institute of Environmental Sciences
CNC	Computer Numerical Control
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> PE!	Cooperative Effort on Process Emissions in Manufacturing
CR	Consistency Ratio
CSR	Corporate Social Responsibility
csv	Comma-Separated Values
d. h.	das heißt
DCB	Dichlorbenzol
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
DL	Dioden-Laser
DP	Design Parameter
dt.	deutsch
DZ	Drahtzuführung
EAA	European Aluminium Association
EDIP	Environmental Design of Industrial Products
ELECTRE	Elimination and Choice Expressing Reality
EN	(elektrische) Energie
engl.	englisch
eniPROD	Spitzencluster „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“
EPS	Environmental Priority System
f.	folgende [Seite]
ff.	folgende [Seiten]
FR	Functional Requirement
FSW	Prozesskette Rührreibschweißen / Friction Stir Welding
FW	Prozess Rührreibschweißen
ggf.	gegebenenfalls
HBS	Hilfs- und Betriebsstoffe
HDL	Prozesskette Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißen
HL	Prozess Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißen
HLP	Hydraulic Oil, Longlife, Extreme Pressure
HP	Hydraulikaggregat Palette
i. d. R.	in der Regel
IMF	International Monetary Fund
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
i. w. S.	im weiteren Sinne
KEA	kumulierter Energieaufwand
KM	Zellenkamera
Krit.	Kriterium
KS	Kreissäge
KU	Kühlung der Optik
LA	Laseranlage



<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
LW	Leitungswasser
MADM	Multiple Attribute Decision Making
MAG	Metallschweißen mit aktiven Gasen
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MAVT	Multi-Attribute Value Theory
MCDM	Multiple Criteria Decision Making
MI	Materialintensität
MIG	Metallschweißen mit inerten Gasen
MIPS	Materialintensität pro Serviceeinheit
MJ	Megajoule
MODM	Multiple Objective Decision Making
MTM	Methods Time Measurement
O	Optimierung
objektbez.	objektbezogen
OC	Öl für Ölkühler und Schmiermittel
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OH	Hydrauliköl
OL	Öl für Rundlauftisch und Werkzeugwechsler
OMG	Object Management Group
RI	Random Index
RO	Roboter
PK	Prozesskette
PR	Presse
PROMETHEE	Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations
Proz.	Prozess
PZ	Prozess
REFA	Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V.
S.	Seite bzw. Seiten
SA	Prozess Sägen
Schäd.	Schädigung
SD	Schweißdraht
SG	Schweißgas

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
SI	Spindel
SP	Spanabsaugung
SR	Steuergerät der Werkzeugmaschine
ST	Steuergerät der Laseranlage
subt	Subtrahieren der Geometrie
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts
UML	Unified Modelling Language
u. a.	unter anderem
V	Vergleich
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
verb	Verbinden der Geometrie
versch.	verschiedene
vgl.	vergleiche
WCED	World Commission on Environment and Development
WGI	Worldwide Gouvernance Indicators
WIG	Wolfram-Inertgasschweißen
WS	Werkstoff
WWF	World Wide Fund For Nature
WZM	Werkzeugmaschine
ZA	Zellenabsaugung
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

# Verzeichnis der Formelzeichen

## Schreibweisen

Vektoren und Matrizen werden in dieser Arbeit durch fettgedruckte Klein- bzw. Großbuchstaben dargestellt.

## Kleine und große altdeutsche Buchstaben

Größe	Einheit	Bezeichnung
$\mathfrak{A}$	-	Mengensystem von Attributen
$\mathfrak{F}$	-	Mengen der Funktionen
$\mathfrak{R}$	-	Mengenfamilie der Ressourcenströme
$\mathfrak{R}'$	-	Mengenfamilie der Ressourcenflüsse
$\mathfrak{s}$	-	Subsystem
$\mathfrak{S}$	-	Mengen der Subsysteme
$\mathfrak{u}$	-	Systemelement
$\mathfrak{U}$	-	Mengen der Systemelemente
$\mathfrak{z}$	-	System
$\mathfrak{Z}$	-	Menge der Systeme

## Kleine und große griechische Buchstaben

Größe	Einheit	Bezeichnung
$\alpha$	-	Gewichtungsfaktor der Ressourceneffizienz
$\varepsilon$	%	Energieeffizienz im weiteren Sinne
$\varepsilon_{ieS}$	%	Energieeffizienz im engeren Sinne
$\varphi$	-	Abbildung auf Netto-Ressourcenströme
$\tilde{\varphi}$	-	Abbildung auf Reuse-Ressourcenströme
$\underline{\varphi}$	-	Abbildung auf Brutto-Ressourcenströme
$\lambda$	-	Eigenwert
$\lambda_{max}$	-	maximaler Eigenwert
$\mu$	%	Materialeffizienz im weiteren Sinne
$\mu_{ieS}$	%	Materialeffizienz im engeren Sinne
$\nu$	-	Abbildung von Prozessschritt auf Zustand
$\omega$	-	Ressourcenfaktor
$\Omega$	-	Menge der Ressourcenfaktoren
$\varrho$	%	Ressourceneffizienz im weiteren Sinne
$\varrho_{ieS}$	%	Ressourceneffizienz im engeren Sinne

## Kleine und große lateinische Buchstaben

Größe	Einheit	Bezeichnung
$a$	-	Anzahl an Ausschuss- oder Sondereinheiten eines Produkts
$a$	-	Element der Paarvergleichsmatrix
$A^+$	-	ideale Ressource
$A^-$	-	anti-ideale Ressource
$A$	-	Paarvergleichsmatrix
$b$	-	zu fertigende Stückzahl eines Produkts
$b$	-	Verbraucher
$B$	-	Menge der Verbraucher
$c$	-	globales Gewicht eines Kriteriums
$d$	$\text{mm}^2 / \text{mm}^3$	Bezugsgröße
$D$	-	Menge der Bezugsgrößen
$D$	-	Entscheidungsmatrix
$E$	-	Einheitsmatrix
$f$	-	Produktfeature
$\tilde{f}$	-	Abbildung von Zustand bzw. Prozessschritt auf Reuse-Ressourcenflüsse
$\underline{f}$	-	Abbildung von Zustand bzw. Prozessschritt auf Brutto-Ressourcenflüsse
$F$	-	Menge der Produktfeatures
$g$	versch.	Parameter einer Technologie
$G$	-	Menge der Parameter einer Technologie
$h$	J	Referenz-Energiebetrag
$H$	-	Menge der Referenz-Energiebeträge
$H_u$	J	Heizwert
$k$	-	Anzahl aller Prozessschritte eines Prozesses
$k$	-	Prozesskette
$K$	-	Menge der Prozessketten
$l$	-	Anzahl aller Zustände eines Verbrauchers
$l$	-	normierte Ausprägung eines Kriteriums
$L$	-	normierte Entscheidungsmatrix
$m$	-	Dimension der Output-Ressourcenströme bzw. -flüsse

Größe	Einheit	Bezeichnung
$m$	-	Anzahl der Ressourcen in einer Entscheidungsmatrix
$n$	-	Dimension der Input-Ressourcenströme bzw. -flüsse
$n$	-	Anzahl der Kriterien eines paarweisen Vergleichs
$n$	-	Anzahl der Kriterien in einer Entscheidungsmatrix
$o$	-	Dimension der Produkt-Ressourcenströme
$p$	-	Prozess
$P$	-	Menge der Prozesse
$r$	g bzw. J	(Netto-)Ressourcenstrom
$R$	-	Menge der (Netto-)Ressourcenströme
$\mathbf{R}$	-	Ressourcenstrom-Zustands-Matrix bzw. Ressourcenstrom-Prozessschritt-Matrix
$r'$	g/s bzw. J/s	(Netto-)Ressourcenfluss
$R'$	-	Menge der (Netto-)Ressourcenflüsse
$\mathbf{R}'$	-	Ressourcenfluss-Zustands-Matrix bzw. Ressourcenfluss-Prozessschritt-Matrix
$\hat{r}$	g bzw. J	Zwischenprodukt-Ressourcenstrom
$\hat{R}$	-	Menge der Zwischenprodukt-Ressourcenströme
$\tilde{r}$	g bzw. J	Reuse-Ressourcenstrom
$\tilde{R}$	-	Menge der Reuse-Ressourcenströme
$\tilde{r}'$	g/s bzw. J/s	Reuse-Ressourcenfluss
$\tilde{R}'$	-	Menge der Reuse-Ressourcenflüsse
$\underline{r}$	g bzw. J	Brutto-Ressourcenstrom
$\underline{R}$	-	Menge der Brutto-Ressourcenströme
$\underline{r}'$	g/s bzw. J/s	Brutto-Ressourcenfluss
$\underline{R}'$	-	Menge der Brutto-Ressourcenflüsse
$s$	-	Prozessschritt
$s^+$	-	Abstand einer Ressource zur idealen Ressource
$s^-$	-	Abstand einer Ressource zur anti-idealen Ressource
$S$	-	Menge der Prozessschritte
$t$	-	Arbeitszeit

---

<b>Größe</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$T$	-	Menge der Arbeitszeiten
$u$	-	gewichtete normierte Ausprägung eines Kriteriums
$u^+$	-	beste gewichtete normierte Ausprägung eines Kriteriums
$u^-$	-	schlechteste gewichtete normierte Ausprägung eines Kriteriums
$U$	-	gewichtete normierte Entscheidungsmatrix
$v$	-	Technologie
$V$	-	Menge der Technologien
$w$	-	lokales Gewicht eines Kriteriums
$w_d$	mm	Wandstärke des Druckluftbehälters
$w_l$	mm	Länge des Druckluftbehälters
$w_r$	mm	Radius des Druckluftbehälters
$\boldsymbol{w}$	-	Eigenvektor
$x$	versch.	Element der Entscheidungsmatrix (d. h. Ausprägung eines Kriteriums)
$x^+$	versch.	beste Ausprägung eines Kriteriums
$x^-$	versch.	schlechteste Ausprägung eines Kriteriums
$z$	-	Verbraucher-Zustand
$Z$	-	Menge der Verbraucher-Zustände

## Indizes und Indexmengen

<b>Index</b>	<b>Bezugsobjekt</b>
AB	b-Achse
AL	Aluminiumlegierung EN AW 6060
AX	x-Achse
AY	y-Achse
AZ	z-Achse
DL	Dioden-Laser
DZ	Drahtzuführung
EN	(elektrische) Energie
FSW	Prozesskette Rührreibschweißen
FW	Prozess Rührreibschweißen
HDL	Prozesskette Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißen
HL	Prozess Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißen
HP	Hydraulikaggregat Palette
<i>i</i>	allgemeiner Index
in	Input
<i>j</i>	Index für Ressourcenströme und -flüsse
<i>k</i>	Index für Kriterien
KM	Zellenkamera
KS	Kreissäge
KU	Kühlung der Optik
<i>l</i>	Index für Kriterien
LW	Leitungswasser
OC	Öl für Ölkühler und Schmiermittel
OH	Hydrauliköl
OL	Öl für Rundlaftisch und Werkzeugwechsler
out	Output
pro	Produkt
RO	Roboter
SA	Prozess Sägen
SD	Schweißdraht
SG	Schweißgas



<b>Index</b>	<b>Bezugsobjekt</b>
SI	Spindel
SP	Spanabsaugung
SR	Steuergerät der Werkzeugmaschine
ST	Steuergerät der Laseranlage
ZA	Zellenabsaugung

<b>Indexmenge</b>	<b>Bezugsobjekt</b>
$I_B$	Verbraucher
$I_{B_H}$	Hilfsaggregate
$I_{B_N}$	Nebenantriebe
$I_{B_S}$	sonstige Verbraucher
$I_{B_W}$	Wirkenergiequellen
$I_D$	Bezugsgrößen
$I_F$	Produktfeatures
$I_G$	Parameter einer Technologie
$I_H$	Referenz-Energiebeträge
$I_K$	Prozessketten
$I_P$	Prozesse
$I_S$	Prozessschritte bzw. Arbeitszeiten
$I_{\mathcal{S}}$	Subsysteme
$I_{S_H}$	Haupt-Prozessschritte bzw. -zeiten
$I_{S_N}$	Neben-Prozessschritte bzw. -zeiten
$I_{S_B}$	Brach-Prozessschritte bzw. -zeiten
$I_{S_R}$	Rüst-Prozessschritte bzw. -zeiten
$I_M$	Systemelemente
$I_V$	Technologien
$I_Z$	Verbraucher-Zustände
$I_3$	Systeme
$J$	Ressourcenströme bzw. -flüsse
$J_E$	energetische Ressourcen
$J_M$	materielle Ressourcen
$J_{M_B}$	Betriebsstoffe
$J_{M_H}$	Hilfsstoffe
$J_{M_W}$	Werkstoffe

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Eine nachhaltige Entwicklung unserer Gesellschaft muss die Befriedigung der Bedürfnisse gegenwärtiger und zukünftiger Generationen sicherstellen (HAUFF & KLEINE 2009, S. 1, WCED 1987, S. 43). Bei deren Ausgestaltung sind die drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales zu berücksichtigen. Der ökologischen Dimension kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu, da sie die Lebensgrundlage der Menschheit bildet und daher die notwendige Voraussetzung für ökonomische und soziale Entwicklungen darstellt. Demgegenüber steht die aktuelle Erkenntnis, dass die natürliche Lebensgrundlage, in der Ökonomie auch natürliche Ressourcen genannt, zunehmend über ihre Regenerationsfähigkeit hinaus genutzt wird (MEADOWS ET AL. 2007, S. 55 ff., WEIZSÄCKER ET AL. 2010, S. 11). ROGALL (2008, S. 31 ff.) nennt fünf zentrale Problemfelder der Gefährdung der natürlichen Lebensgrundlage (vgl. Abbildung 1): die Zerstörung von Ökosystemen, Arten- und Landschaftsvielfalt, die Gefährdung der menschlichen Gesundheit, den Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen, die Übernutzung erneuerbarer Ressourcen sowie den Klimawandel.

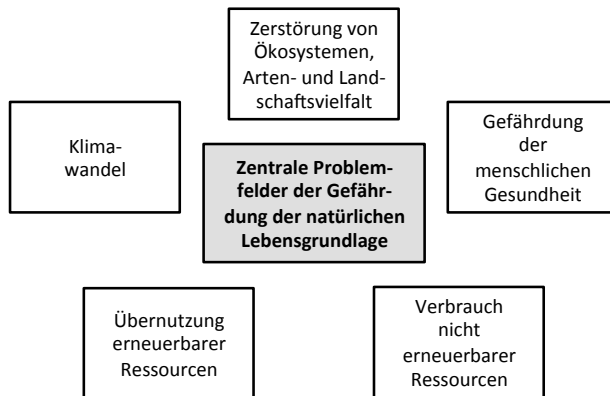


Abbildung 1: Zentrale Problemfelder der Gefährdung der natürlichen Lebensgrundlage (in Anlehnung an ROGALL (2008))

Den Schätzungen der Vereinten Nationen zufolge wird die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2025 auf etwa 8 Milliarden Menschen anwachsen. Bis zum Jahr 2050 wird eine weitere Steigerung auf über 9 Milliarden Menschen prognostiziert (UNITED NATIONS 2009, S. 49). Gleichzeitig wächst die Wirtschaft der

Schwellenländer stark an (IMF 2010, S. 61 ff.), was eine Annäherung ihres Konsumverhaltens an das der Industrieländer mit sich bringt (TNS 2010, S. 6, ROGALL 2008, S. 66). Diese Kombination aus Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum beschleunigt den Verbrauch der natürlichen Ressourcen in hohem Maße. Die Konsequenzen können bildlich anhand des ökologischen Fußabdrucks aufgezeigt werden (vgl. Abbildung 2). Der ökologische Fußabdruck ist eine Messgröße für die menschliche Inanspruchnahme der Biokapazität der Erde, der biologisch produktiven Fläche, die die Grundlagen für den Konsum liefert sowie die entstehenden Abfälle und Emissionen aufnimmt. Demnach benötigte die Weltbevölkerung im Jahr 2010 bereits das 1,5-Fache der ökologischen Quellen und Senken unserer Erde. Unter Beibehaltung der aktuellen Konsum- und Produktionsgewohnheiten wird es laut Prognosen des WWF (2010, S. 89) im Jahr 2050 das 2,8-Fache sein. Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen stellt der Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen eine zentrale Herausforderung dar.

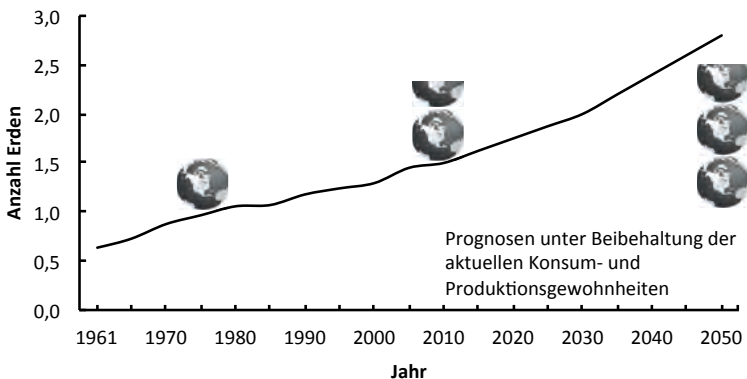


Abbildung 2: Zukünftige Entwicklung des globalen ökologischen Fußabdrucks (in Anlehnung an WWF (2010, S. 89))

Große internationale Institutionen wie die EUROPÄISCHE KOMMISSION (2003, S. 10) oder die OECD (2001, S. 11) sehen den Ansatzpunkt für einen nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen in der Entkopplung<sup>1</sup> der Ressourcennutzung und ihrer Umweltauswirkungen vom Wirtschaftswachstum. Um diese Entkopplung zu ermöglichen, müssen alle Akteure einer Volkswirtschaft ihren Beitrag zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs leisten.

---

<sup>1</sup> Es ist zwischen einer relativen und absoluten Entkopplung zu unterscheiden. Bei einer relativen Entkopplung steigt der Ressourcenverbrauch zwar an, aber weniger als das wirtschaftliche Wachstum. Bei einer absoluten Entkopplung nimmt der Ressourcenverbrauch ab, während die Wirtschaft wächst.

Die Industrie wird als wichtiger Befähiger für eine nachhaltige Entwicklung angesehen (JOVANE ET AL. 2009). Dies gilt im besonderen Maße für Deutschland, dessen Wirtschaft einen sehr starken industriellen Sektor aufweist. So haben produzierende Unternehmen in Deutschland mit 29 % den größten Anteil am gesamtdeutschen Energieverbrauch (BAYER 2009, S. 10). Außerdem sind sie Hauptverbraucher von Rohstoffen und Material. Im Jahr 2008 wurden in Deutschland z. B. 41,6 Mio. t Stahl, 2 Mio. t Aluminium und 1,4 Mio. t Kupfer in der Produktion benötigt (BGR 2010, S. 145 ff.). Zugleich liegt das wirtschaftlich umsetzbare Einsparpotential des Energie- und Materialverbrauchs bei 10 bis 30 % (KRISTOF ET AL. 2008, S. 55, MCKINSEY 2009, S. 51), wodurch das Thema Energie- und Materialeffizienz verstärkt in den Fokus von Industrieunternehmen tritt (HOFFMANN ET AL. 2008, S. 20). Die Europäische Union gab dahingehend bereits entsprechende Richtlinien heraus, die frühzeitig eine positive Entwicklung hinsichtlich der Ressourceneffizienz in der Industrie hervorrufen sollen und aktuell in den nationalen Gesetzgebungen der einzelnen Mitgliedsstaaten umgesetzt werden (z. B. EUROPÄISCHE UNION 2002, EUROPÄISCHE UNION 2009). Des Weiteren werden das Image und der wirtschaftliche Erfolg eines Unternehmens zunehmend durch dessen Einsatz für eine ressourceneffiziente und ökologische Produktion geprägt (KIRCHHOFF 2006, UHLMANN 2008).

Diese Rahmenbedingungen haben dazu geführt, dass Unternehmen die ökologischen Auswirkungen ihrer Produkte während deren Nutzungs- und Entsorgungsphase bereits heute in der Konstruktion berücksichtigen. Allerdings spielen der Verbrauch von Ressourcen und die Belastung der Umwelt mit Abfällen nicht nur bei der Nutzung und Entsorgung eines Produkts, sondern auch im besonderen Maße während dessen Herstellung eine Rolle. Wenn das Produkt konstruiert ist, ist die Planung und Ausgestaltung seiner Fertigung bestimmend für den Verbrauch von Ressourcen und die Belastung der Umwelt mit Fertigungsabfällen (GUTOWSKI ET AL. 2009). Aufgrund der mangelnden Transparenz wird dem Ressourceneinsatz während der Fertigung aktuell wenig Beachtung geschenkt (DUFLOU ET AL. 2011). Um den Ressourcenverbrauch der Produktion transparent zu machen und damit schlussendlich vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln, bedarf es geeigneter Bewertungskenngrößen (WEGNER ET AL. 2010, S. 102). Insbesondere ist es notwendig, den bisherigen Kennwertsystemen der Fabrik- und Anlagenplanung Werkzeuge und Methoden hinzuzufügen. Diese müssen relevante Einflussgrößen auf den Energie- und Materialbedarf möglichst vollständig erfassen sowie die Bewertung und Planung des Ressourcenverbrauchs sowohl in der Investitions- als auch in der Betriebsphase ermöglichen (NEUGEBAUER 2008, S. 350). Denn auch hier gilt der Grundsatz: „If you cannot measure it, you cannot improve it.“ (LORD KELVIN).

### 1.2 Thematische Einordnung

#### 1.2.1 Allgemeines

Um ein einheitliches Verständnis für die anschließende Zielsetzung (vgl. Abschnitt 1.3) der vorliegenden Arbeit zu gewährleisten, wird im Folgenden eine thematische Einordnung vorgenommen. In diesem Rahmen erfolgt zudem eine Abgrenzung der verwendeten Begrifflichkeiten, welche, je nach Kontext und Wissenschaftsbereich, auf unterschiedliche Weise interpretiert werden können.

#### 1.2.2 Ressourcen

##### 1.2.2.1 Definition und Kategorisierung

Die Begriffe Ressourcen und Produktionsfaktoren werden im ökonomischen Kontext synonym verwendet. In der klassischen Ökonomie fallen hierunter alle Inputs, untergliedert in Arbeit, Kapital und Boden, die beim Produktionsvorgang in einem Unternehmen zur Herstellung neuer Güter gebraucht werden (POLLERT ET AL. 2010, STOBBE 1994, S. 5). In der neuen Umweltökonomie wird der Produktionsfaktor Boden weiter gefasst und als Naturkapital bzw. natürliche Ressourcen bezeichnet, worunter alle Bestandteile der Natur verstanden werden (ROGALL 2008, S. 57). ROGALL (2008, S. 58) spezifiziert den Begriff *natürliche Ressourcen* mithilfe vier verschiedener Kategorien:

1. „Erneuerbare Ressourcen, die aber erschöpfbar sind, wenn ihre Regenerationsrate überschritten wird: alle Tiere und Pflanzen (Artenvielfalt).
2. Nicht erneuerbare Rohstoffe und Primärenergieträger (Kohle, Erdöl und Erdgas): Sie können sich in menschlichen Zeitmaßen nicht regenerieren und sind daher knapp.
3. Quasi unerschöpfliche Ressourcen (jedenfalls für menschliche Zeiträume) wie Sonne, Wind, Gezeiten und Erdwärme.
4. Umweltmedien: Boden, Wasser, Luft.“

Eine differenziertere, stärker an der betrieblichen Leistungserstellung im Fertigungsumfeld orientierte Untergliederung der Produktionsfaktoren findet sich in der Betriebswirtschaftslehre. Die unterschiedlichen Kategorisierungsmöglichkeiten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Grundsätzlich werden die Elementarfaktoren, bestehend aus der ausführenden menschlichen Arbeitsleistung, den Betriebsmitteln und den Werkstoffen, für die Erstellung von Produkten kombiniert. Bei der allgemeinen menschlichen Arbeitsleistung kann eine zusätzliche Differenzierung zwischen objektbezogener und dispositiver Arbeit vorgenommen werden. Die *objektbezogene Arbeit* dient

unmittelbar der Leistungserstellung und ist somit ein Elementarfaktor. Die *dispositive Arbeit* beschäftigt sich, als sogenannter dispositiver Faktor, mit der Leitung und Lenkung betrieblicher Vorgänge. Zu den Betriebsmitteln zählen alle Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Einrichtungen und Anlagen, die die technischen Voraussetzungen für die betriebliche Leistungserstellung bieten. Rohstoffe, Halb- und Fertigerzeugnisse sowie die wiederverwendeten Abfälle solcher Stoffe werden den *Werkstoffen* zugeordnet (GUTENBERG 1983, S. 3 ff.). In dieser Arbeit werden allerdings unter dem Begriff *Betriebsmittel* „Maschinen, Anlagen und alle sonstigen Geräte, die in irgendeiner Weise in einem Arbeitssystem daran beteiligt sind, die Arbeitsaufgabe zu erfüllen“ analog zu REFA (1993, S. 43) verstanden. Eine zusätzliche Gliederung ergibt sich durch die Einteilung der Produktionsfaktoren nach ihrem Verbrauchsmuster. Es kann diesbezüglich zwischen Repetierfaktoren und Potentialfaktoren unterschieden werden. *Repetierfaktoren* gehen materiell unter, sind i. d. R. beliebig teilbar und müssen häufig wiederbeschafft werden. Dazu zählen alle Werkstoffe sowie die den Betriebsmitteln zugeordneten Hilfs- und Betriebsstoffe. Materiell beständige, nicht beliebig teilbare und in großen Zeitabständen wiederzubeschaffende Elementarfaktoren wie Anlagen und Arbeitskräfte werden als *Potentialfaktoren* bezeichnet (HEINEN 1992, S. 166).

Tabelle 1: Gliederung der Produktionsfaktoren nach GUTENBERG (1983) und HEINEN (1992)

Elementarfaktoren						dispositive Faktoren	
Repetierfaktoren			Potentialfaktoren				
Rohstoffe	halbfertige/fertige Erzeugnisse	wiederverwendete Abfallstoffe	Hilfsstoffe	Betriebsstoffe	Einrichtungen/Anlagen	Ausführung	Leitung
Werkstoffe			Betriebsmittel			objektbez. Arbeit	dispositive Arbeit
Kapital/Boden						Arbeit	

### 1.2.2.2 Ressourceneffizienz

Allgemein wird unter Effizienz das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand verstanden. Der Begriff Ressourceneffizienz drückt diesen Zusammenhang auf Ressourcen bezogen aus. Im Folgenden werden bereits bestehende Definitionen aufgeführt und darauf aufbauend die unterschiedlichen Ausprägungen der Ressourceneffizienz herausgearbeitet.

Die EUROPÄISCHE KOMMISSION (2003, S. 9) verwendet die Begriffe Ressourceneffizienz und Ressourcenproduktivität synonym und definiert sie als die Effizienz, „(...) mit der Energie und Materialien in der Wirtschaft genutzt werden, d. h. der Mehrwert je Einheit Ressourceninput. (...) Die obige Definition von Ressourceneffizienz bezieht sich nur auf die Nutzung, der die Ressourcen zugeführt werden. Das bedeutet, dass unberücksichtigt bleibt, wie die Ressourcen gewonnen oder geerntet werden (der Wirtschaftstätigkeit vorgeschaltet) oder wie sie zu Luft, Wasser und Boden stehen (der Wirtschaftstätigkeit nachgelagert). Um die Umweltauswirkungen der Ressourcennutzung ganz zu erfassen, müssen die Tätigkeiten im vor- und nachgelagerten Bereich ebenfalls einbezogen werden.“

Auch ROGALL (2008, S. 26) setzt die Begriffe Ressourceneffizienz und Ressourcenproduktivität gleich. Anders als die EUROPÄISCHE KOMMISSION (2003) integriert er jedoch die Ressourcennutzung der vor- und nachgelagerten Tätigkeiten in seine Definition, indem er sich auf die natürlichen Ressourcen bezieht: „(Ressourceneffizienz) drückt das Verhältnis vom Output zum Einsatz der natürlichen Ressourcen aus (z. B. einem Produkt oder dem Bruttoinlandsprodukt – BIP). Hierbei wird auch die Schadstofffreisetzung als Verbrauch natürlicher Ressourcen angesehen. (...) Damit sagt die Entwicklung der R(essourceneffizienz) etwas darüber aus, wie effizient eine Volkswirtschaft [Anm.: oder ein produzierendes Unternehmen] mit den natürlichen Ressourcen umgeht. Sie sagt aber nichts darüber aus, wie hoch der absolute Verbrauch ist.“

SCHÜTZ & BRINGEZU (2008, S. 105) unterscheiden hingegen die Begriffe Ressourceneffizienz und Ressourcenproduktivität: „Ressourceneffizienz bezieht sich allgemein auf das Verhältnis eines erwünschten Outputs eines Prozesses zu dem damit verbundenen Ressourcenaufwand oder -input. Ist der Output eine ökonomische Größe, z. B. Wertschöpfung oder BIP, so spricht man im gesamtwirtschaftlichen Kontext von ‚Ressourcenproduktivität‘. Die Ressourceneffizienz von Prozessen kann sich jedoch auch auf das Verhältnis von physischen Relationen beziehen, z. B. das Verhältnis von verwerteter Rohstoffentnahme zur Gesamtextraktion von Primärmaterial.“

Aus den oben genannten Definitionen wird ersichtlich, dass das Verständnis von Ressourceneffizienz variiert. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Ressourceneffizienz sind in Abbildung 3 dargestellt. Hinsichtlich des Nutzens ist



es möglich, als Bezugsgröße die ökonomisch quantifizierte Wertschöpfung, wie z. B. den Produktpreis, heranzuziehen. Eine andere Möglichkeit, diesen auszudrücken, bietet die Beschreibung über physische Größen, wie beispielsweise die Produktmasse. Bezüglich des Aufwands kann sich der Betrachtungsumfang sowohl im Hinblick auf das zugrundeliegende Ressourcenverständnis als auch in Bezug auf die gewählte Systemgrenze unterscheiden. Im engeren Sinne werden nur die unmittelbar im Prozess verbrauchten Ressourcen, Energie und Material, als Aufwand betrachtet. Ein im weiteren Sinne gefasstes Verständnis schließt auch die mittelbare Nutzung der natürlichen Ressourcen mit ein, welche die direkt im Prozess eingesetzten Ressourcen mit sich bringen. Hierunter sind beispielsweise die Schädigung der Ozonschicht durch gasförmige Emissionen oder die Landnutzung für den notwendigen Erzabbau des verwendeten Stahls zu verstehen. Die gewählte Systemgrenze ist fast beliebig skalierbar. Es kann jedoch grob unterschieden werden, ob nur die für den betrachteten Prozess verwendeten Ressourcen als Aufwand angerechnet werden oder zusätzlich die Verbräuche der vor- und nachgelagerten Prozesse<sup>2</sup>. Die Ressourceneffizienz ist zudem über alle Definitionen hinweg eine relative Messgröße und gibt daher nicht den absoluten Verbrauch wieder.

Merkmal		Merkmalausprägung	
<b>Nutzen</b>	Bezugsgröße	ökonomische Größe	physische Größe
<b>Aufwand</b>	Ressourcenverständnis	Ressourcen im engeren Sinne (Energie und Material)	Ressourcen im weiteren Sinne (natürliche Ressourcen)
	Systemgrenze	Prozess	Prozess inkl. Vor- und Nachprozesse

Abbildung 3: Ausprägungen der Ressourceneffizienz

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Nutzen über physische Größen beschrieben. Seitens des Aufwands wird sowohl das Ressourcenverständnis im engeren Sinne als auch das im weiteren Sinne berücksichtigt. Diese Unterscheidung wird ergänzt durch die Festlegung einer direkt den Prozess betreffenden und einer erweiterten Systemgrenze. Daraus ergeben sich die Ressourceneffizienz im engeren Sinne und die im weiteren Sinne, wobei jeder der Ansätze einen eigenständigen, wichtigen Betrachtungsschwerpunkt bietet.

<sup>2</sup> Die vor- und nachgelagerten Prozesse werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch als Vor- und Nachprozesse bezeichnet.

### 1.2.3 Aspekte der Fertigungsgestaltung

Wie bereits in Abschnitt 1.1 erwähnt, trägt der Fertigungsbereich im besonderen Maße zum Verbrauch von Ressourcen und zur Belastung der Umwelt durch Emissionen bei, da dieser den Kernbereich der Wertschöpfung eines produzierenden Unternehmens bildet. Im Folgenden werden zunächst einige Grundlagen und Begrifflichkeiten der Fertigung erklärt, um anschließend Ansatzpunkte für die Steigerung der Ressourceneffizienz herauszuarbeiten.

Nach HIRSIG (1995, S. 275) umfasst die *Fertigung* „(...) die Umwandlung von Rohmaterialien in Einzelteile unter Einbeziehung technischer und organisatorischer Hilfsmittel und Methoden.“ Die DIN 8580 (2003) spezifiziert die Fertigungsverfahren als „alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern. Sie schließen die Verfahren zur Gewinnung erster Formen aus dem formlosen Zustand, zur Veränderung dieser Form sowie zur Veränderung der Stoffeigenschaften ein.“ Im Rahmen der DIN 8580 (2003) erfolgt eine Einteilung der Verfahren in sechs Hauptgruppen, die zum einen anhand der Änderung des Stoffzusammenhalts und zum anderen bezüglich der Formgebung und des Einflusses auf die Stoffeigenschaften untergliedert werden (vgl. Tabelle 2). Der Begriff Technologie wird häufig als Synonym für den Begriff Fertigungsverfahren genutzt.

Tabelle 2: Gliederung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (2003)

Schaffen der Form	Ändern der Form			Ändern der Stoffeigenschaften	
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		
Hauptgruppe 1 Urformen	Hauptgruppe 2 Umformen	Hauptgruppe 3 Trennen	Hauptgruppe 4 Fügen	Hauptgruppe 5 Beschichten	Hauptgruppe 6 Stoffeigenschaften ändern

Ein *Fertigungsverfahren* bzw. eine *Technologie* stellt ein generisches, vom Betriebsmittel unabhängiges Wirkprinzip dar (EVERSHEIM 1996, S. 44). FALLBÖHMER (2000, S. 14 f.) unterscheidet hinsichtlich des Konkretisierungsgrads Technologieketten, Prozessfolgen und Fertigungsfolgen. Eine *Technologiekette* ist eine abstrakte, produktionsmittelunabhängige Kombination von Fertigungstechnologien bzw. Fertigungsverfahren in definierter Reihenfolge zur Herstellung eines Produkts. Die einzelnen Technologien sind hierbei über Werkstückzwischenzustände verbunden (vgl. Abbildung 4). Eine *Prozessfolge* entspricht der betriebsmittelbezogenen Technologiekette. Bei einer *Fertigungsfolge* werden

neben den direkt wertschöpfenden Fertigungsschritten auch die im Materialfluss zur Herstellung eines Produkts notwendigen Handhabungs-, Prüf-, Lager- und Transportschritte inklusive deren Betriebsmittel berücksichtigt. Im Rahmen dieser Arbeit ist eine Unterscheidung zwischen Prozessfolgen und Fertigungsfolgen nicht zielführend, da das Vorgehen zur Bewertung der Ressourceneffizienz in beiden Fällen identisch ist, solange mindestens ein wertschöpfender Prozess beteiligt ist. Als allgemeine Bezeichnung für den Einsatz einer Technologie auf einem bestimmten Betriebsmittel wird der Begriff *Fertigungsprozess* nach EVERSHEIM (1997, S. 27) gewählt. Entsprechend wird eine Aneinanderreihung von direkt wertschöpfenden Fertigungsprozessen und ggf. nicht wertschöpfenden Prozessen zur schrittweisen Erfüllung der Fertigungsaufgabe im Folgenden als *Fertigungsprozesskette* bezeichnet.

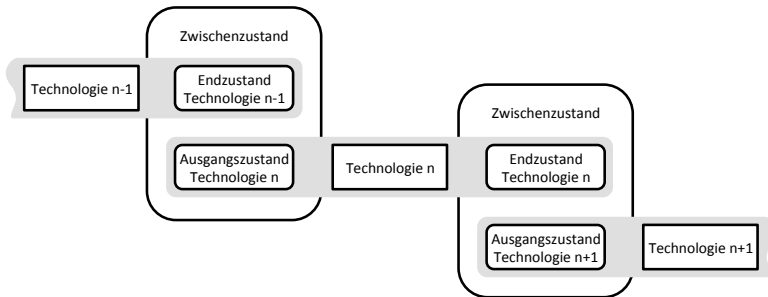


Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer Technologiekette nach FALLBÖHMER (2000, S. 101)

Zur Charakterisierung einer Fertigung kann zwischen unterschiedlichen Fertigungsarten differenziert werden, die sich durch die Wiederholhäufigkeit bestimmter Werkstücke sowie durch die produzierte Stückzahl pro Periode bestimmen lassen. Nach aufsteigender Stückzahl und Wiederholhäufigkeit geordnet, werden als Fertigungsarten Einzelfertigung, Kleinserienfertigung, Großserienfertigung und Massenfertigung unterschieden. Zwischen den einzelnen Fertigungsarten sind die Grenzen fließend und die spezifischen Stückzahlen und Wiederholhäufigkeiten sind abhängig von dem betrachteten Fertigungsverfahren (EVERSHEIM 1996, S. 103).

Das Soll-Verhalten einer Fertigung wird bei deren Planung festgelegt. Bezüglich der vorhandenen Freiheitsgrade bzw. Planungspotentiale kann grundsätzlich zwischen Neuplanung und Umplanung unterschieden werden. Die Neuplanung bietet die höchsten Freiheitsgrade. Diese erstrecken sich von der Auswahl geeigneter Technologien, unter Berücksichtigung der Bearbeitungsaufgabe und der geplanten Produktionsmenge, über die Anordnung der Betriebsmittel bis hin zur Planung der Gebäudestruktur. Mit einer Umplanung wird die Optimierung

der Produktionsbedingungen bei größtenteils vorhandenen Betriebsmitteln beabsichtigt. Die Zahl der Freiheitsgrade ist hierbei geringer und reduziert damit auch das mögliche Verbesserungspotential (EVERSHEIM 1996, S. 107 f.). Entscheidend für die Ausgestaltung der Fertigung, insbesondere bei einer Neuplanung, sind die herzustellenden Produkte. Die Möglichkeiten zur Beeinflussung der Ressourceneffizienz von Fertigungsprozessen sollen daher anhand des Zusammenspiels von Produktlebenszyklus und Technologiemanagement aufgezeigt werden (vgl. Abbildung 5).

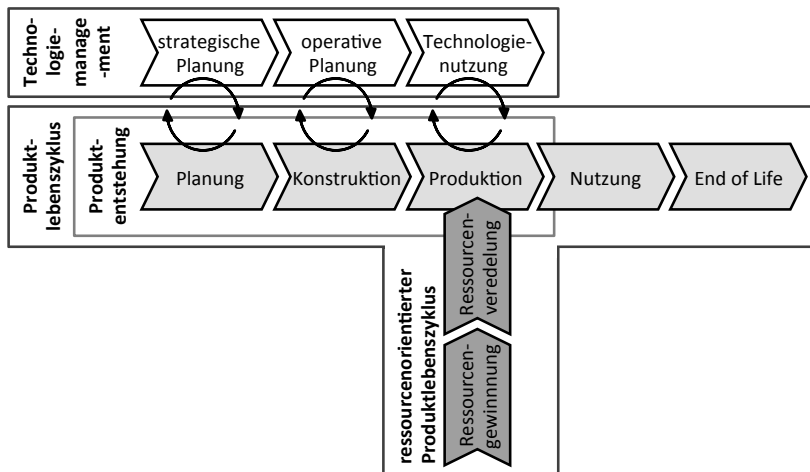


Abbildung 5: Interaktion zwischen Technologiemanagement und Produktlebenszyklus

Der *Produktlebenszyklus* gibt alle Phasen wieder, die ein Produkt grundsätzlich durchläuft. Zunächst erfolgt die Produktplanung, die unter Berücksichtigung der Marktanforderungen und der Unternehmensziele durch eine systematische Suche und Auswahl zukunfts-trächtiger Produktideen das herzustellende Produkt festlegt. Sie schafft damit auch den Gestaltungsrahmen für die Konstruktion des Produkts. Hier werden die Gestaltungsmerkmale und somit die Eigenschaften eines Produkts definiert und entwickelt. Das Ergebnis des Konstruktionsprozesses ist die Dokumentation der geometrischen, strukturellen und technologischen Produktmerkmale (EVERSHEIM & SCHUH 1999, S. 7 ff.). Daran schließt sich die Produktionsphase an, die Fertigung und Montage zusammenfasst. Hier werden Rohmaterialien und halbfertige Erzeugnisse in fertige Erzeugnisse bzw. Produkte umgewandelt (WESTKÄMPER ET AL. 2006, S. 3). Die Phasen der Planung, Konstruktion und Produktion werden unter dem Begriff der *Produktentstehung* zusammengefasst. Anschließend geht das Produkt in seine Nutzungsphase über,

in welcher es seiner Bestimmung entsprechend zur Anwendung kommt. Zuletzt durchläuft das Produkt die Phase des End of Life. Diese kann sowohl die Entsorgung als auch die Weiter- und Wiederverwendung des Produkts bzw. seiner Bestandteile beinhalten. Wird der Produktlebenszyklus aus einer ressourcenorientierten Perspektive dargestellt, beginnt dieser *ressourcenorientierte Produktlebenszyklus* nicht mit der Planung und Konstruktion des Produkts, sondern mit der Gewinnung und Veredelung der für die Produktion notwendigen Ressourcen.

Während der Produktentstehung besteht eine enge Verzahnung mit den Phasen des *Technologiemanagements*. Für die Fertigungsgestaltung sind insbesondere folgende Teilaspekte des Technologiemanagements<sup>3</sup> relevant: strategische Planung, operative Planung und Nutzung. Dabei ändert sich das Technologieverständnis von dem generischen Fertigungsverfahren in der strategischen Planung zum betriebsmittelabhängigen Fertigungsprozess in der operativen Planung und Nutzungsphase (FALLBÖHMER 2000, S. 14 f.; TROMMER 2001, S. 30 ff.). Während der strategischen Planung wird das Ziel verfolgt, Potentiale zu schaffen, um die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens auszubauen und Produkt- und Prozessinnovationen zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang wird geprüft, ab wann eine neue Technologie einsatzfähig ist und es wirtschaftlich ist von einem veralteten Fertigungsverfahren auf ein neues zu wechseln (REINHART & SCHINDLER 2010). In der operativen Technologieplanung werden die in der strategischen Technologieplanung gefassten kurz- bis mittelfristigen Ziele umgesetzt. Dabei steht der optimale Einsatz der ausgewählten Technologie im Fokus der Betrachtung (EVERSHEIM & SCHUH 1999, S. 10 ff.). Die Technologienutzung umfasst die technische Umsetzung sowie die Anwendung des Fertigungsprozesses. Das Ausmaß der möglichen Beeinflussung des Ressourcenverbrauchs in den Phasen der Technologieplanung und -nutzung ist in Abbildung 6 dargestellt.

Sowohl während der Technologieplanung als auch während der Produktentstehung finden sich entsprechend vielfältige Ansatzpunkte für die Beeinflussung der Ressourceneffizienz der Fertigung (REBITZER ET AL. 2004). Die Ressourceneffizienz kann einerseits durch die geeignete Planung und Konstruktion der zu fertigenden Produkte und andererseits durch die Auswahl der besten Technologiealternativen und die Bestimmung des umzusetzenden Konzepts erhöht werden. Es finden also insbesondere während der Technologieplanung Entscheidungen statt, bei denen die Ressourceneffizienz entsprechend zu berücksichtigen ist. Diese Einflussmöglichkeiten nehmen zukünftig weiter zu, da die Anzahl der Technologien und somit auch der einsetzbaren Prozessketten steigen werden (ABELE & REINHART 2011, S. 17).

---

<sup>3</sup> Alle, z. T. umfassenden Aufgaben des Technologiemanagements werden im Rahmen dieser Arbeit nicht erläutert. Einen Überblick hierzu bieten z. B. SCHUH & KLAPPERT (2011).

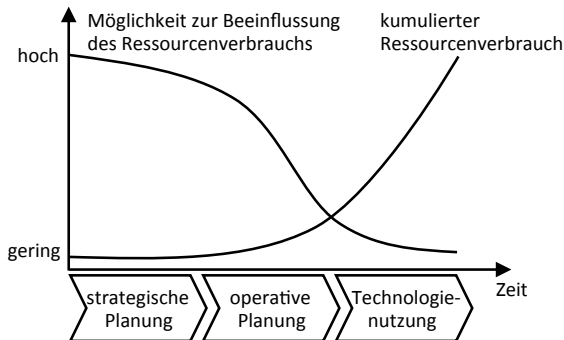


Abbildung 6: Möglichkeiten zur Beeinflussung des Ressourcenverbrauchs (in Anlehnung an SCHREMS ET AL. (2011))

## 1.3 Zielsetzung

### 1.3.1 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz von Fertigungsprozessketten. Die Methode soll Transparenz hinsichtlich der Effizienz des Ressourcenverbrauchs in der Fertigung erzeugen und damit die Basis für eine effektive Optimierung schaffen. Zu diesem Zweck soll eine Kennzahl hergeleitet werden, die als Maßeinheit für die Ressourceneffizienz eines Fertigungsprozesses bzw. einer Fertigungsprozesskette dient. Die Kennzahl soll analog zu Zielgrößen der Wirtschaftlichkeitsbewertung, wie z. B. dem Kapitalwert, insbesondere in der Planungsphase zur Entscheidungsunterstützung aber auch zur Feststellung des Status quo einer bestehenden Fertigung eingesetzt werden können.

Um die Ressourceneffizienz einer Fertigungsprozesskette ermitteln zu können, wird zunächst ein Vorgehen für die Modellierung der Ressourcenströme definiert. Bei einem erweiterten Ressourcenverständnis ist die Quantifizierung der unmittelbar auftretenden Ressourcenströme alleine jedoch nicht ausreichend. Daher ist es zusätzlich notwendig, die Auswirkungen des jeweiligen Ressourcenstroms auf die natürlichen Ressourcen abzubilden und in die Bewertung einzubeziehen. Auch die Bestimmung der Umweltwirkung bedarf einer methodischen Unterstützung, die zusätzlich die Präferenzen und Schwerpunkte des Fertigungsunternehmens berücksichtigen muss. Die Methode soll damit einen Ansatz zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs in der Fertigung liefern und die Grundlage für dessen zielgerichtete Entkopplung vom Wirtschaftswachstum bilden.

### 1.3.2 Eingrenzung des Betrachtungsraums

Anhand des in Abschnitt 1.2 aufgespannten Betrachtungsraums wird die Zielsetzung weiter konkretisiert. Dies dient zum einen der zielgerichteten Untersuchung des Stands der Erkenntnisse in Kapitel 2 und zum anderen der eindeutigen Abgrenzung des Untersuchungsbereichs der vorliegenden Arbeit von weiteren Fragestellungen. Die gewählten Schwerpunkte sind in Abbildung 7 dargestellt.

Merkmal	Merkmalausprägung					Themen- gebiet	
Produktions- faktoren	Repetierfaktoren		Potentialfaktoren		dispositive Faktoren	Ressourcen	
Ressourcen- verständnis	im engeren Sinne			im weiteren Sinne			
Produkt- lebenszyklus	Pla- nung	Konst- ruktion	Produktion		Nutzung	End of Life	Lebens- zyklus- phasen
Betriebsmittel- lebenszyklus	Pla- nung	Konst- ruktion	Produktion		Nutzung	End of Life	
Fertigungsart	Einzelfertigung		Serienfertigung		Massenfertigung		An- wendung
Technologie- management	strategische Planung		operative Planung		Technologienutzung		

Abbildung 7: Morphologie zur Eingrenzung des Betrachtungsraums

In die Bewertung gehen nur die direkt im Fertigungsprozess verwendeten Ressourcen ein. Daher erfolgt eine Eingrenzung auf die Repetierfaktoren, d. h., es werden nur Ressourcen beachtet, die verbraucht werden. Hierzu gehört auch der Verbrauch nutzbarer Energie<sup>4</sup>. Potentialfaktoren, die genutzt werden, wie menschliche Arbeitsleistung oder technische Anlagen, werden nicht berücksichtigt. Die Abgrenzung begründet sich zum einen in der Definition der natürlichen Ressourcen, zu denen die menschliche Arbeit nicht gezählt wird (vgl. Abschnitt 1.2.2.1). Zum anderen stellt die Definition von Repetierfaktoren die Bedingung der Unmittelbarkeit des Verbrauchs, welche die Berücksichtigung von Anlagen ausschließt<sup>5</sup>. Allgemein wird das zugrunde liegende Verständnis

<sup>4</sup> Im physikalischen Sinne des 1. Hauptsatz der Thermodynamik ist der Verbrauch von Energie nicht möglich. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird unter Energieverbrauch die Wandlung einer für die technische Anwendung leicht nutzbare in eine schwierig nutzbare Energieform verstanden, z. B. elektrische Energie in Wärmeenergie.

<sup>5</sup> Soll der Ressourcenverbrauch zur Erstellung einer Anlage erfasst werden, kann die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Methode zur Erfassung der Ressourcenströme aller durchgeführten Herstellungsprozesse der Anlage herangezogen werden. Damit kann der initiale „Ressourceninvest“ für die Anlage festgestellt und ggf. in eine erweiterte Betrachtung integriert werden.

von Ressourcen weiter gefasst und bezieht somit die Auswirkungen auf die natürlichen Ressourcen mit ein.

Bezogen auf den Lebenszyklus des herzustellenden Produkts beschränkt sich die Quantifizierung der Ressourcenströme auf dessen Produktionsphase. Aus Sicht der in der Produktion verwendeten Betriebsmittel, auf denen die Fertigungsverfahren zur Produktherstellung eingesetzt werden, entspricht dies wiederum der Nutzungsphase in deren Lebenszyklen.

Die in der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Methode soll sich grundsätzlich zur Bewertung der Ressourceneffizienz jeglicher Fertigungsprozessketten eignen. Die Umstände, unter denen ein Einsatz solch einer Methode besonders sinnvoll ist, lassen sich jedoch einschränken. Zum einen im Hinblick auf die Fertigungsart, da durch die Mengeneffekte bei der Serien- und Massenfertigung auch geringe Einsparungen pro Produkt große Auswirkungen haben und somit der Aufwand für die Bewertung gerechtfertigt ist. Zum anderen ist eine Anwendung insbesondere während der operativen Technologieplanung zu empfehlen, da während dieser Phase die alternativen Fertigungsprozessketten i. d. R. bereits feststehen und gleichzeitig die Möglichkeiten zur Beeinflussung des Ressourcenverbrauchs der Fertigung groß sind (vgl. Abbildung 6).

### 1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel untergliedert. In diesem Kapitel wurden eine Einführung in das Themengebiet, in das sich die Arbeit einfügt, sowie in die grundsätzliche Zielsetzung und den Betrachtungsraum gegeben. Einen kurzen Überblick über die Struktur und die Inhalte der Arbeit gibt Abbildung 8.

In Kapitel 2 wird der Stand der Erkenntnisse dargestellt. Dazu werden zunächst die methodischen Grundlagen der Ökobilanzierung als Basis einer ressourcenorientierten Bewertung erläutert. Darauf aufbauend werden bestehende Untersuchungen mit Fokus auf den Ressourcenverbrauch von Fertigungsprozessen und existierende Ansätze zur Ökobilanzierung im Fertigungsumfeld beschrieben. Auf Basis einer Analyse dieser bereits durchgeführten Arbeiten wird der Handlungsbedarf aufgezeigt.

Kapitel 3 beschreibt den entwickelten Ansatz zur Bewertung der Ressourceneffizienz. Hierfür werden zunächst die Anforderungen an die Methode definiert. Daraufhin erfolgt eine genauere Betrachtung der in der Fertigung eingesetzten Ressourcen. Basierend auf den allgemeinen Rahmenbedingungen der Ökobilanzierung und den gestellten Anforderungen wird die Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung mit ihren vier Phasen abgeleitet.



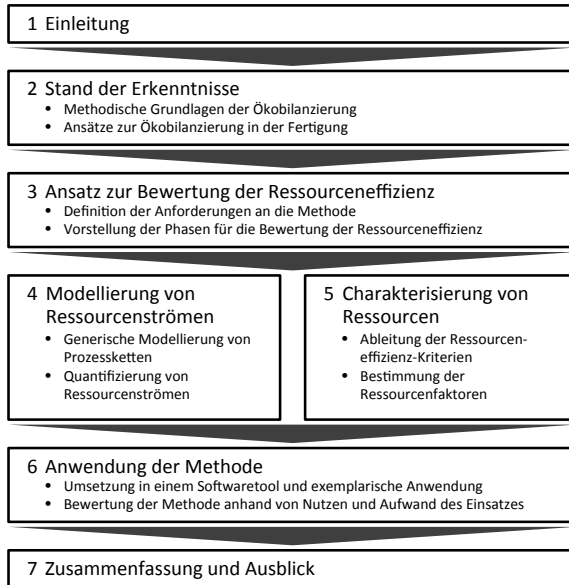


Abbildung 8: Struktur der Arbeit

Eine Detaillierung der Methode erfolgt in Kapitel 4 und Kapitel 5. Kapitel 4 behandelt zum einen die systemtheoretische Modellierung von Fertigungsprozessketten als Hauptbestandteile der Fertigung. Zum anderen wird die Quantifizierung der in eine Prozesskette ein- und ausgehenden Ressourcenströme beschrieben. Kapitel 5 erläutert die Ableitung von charakteristischen Faktoren für jede Ressource und zwar abhängig davon, ob diese in die Prozesskette eingeht oder aus der Prozesskette herauskommt. Diese Faktoren geben die Umweltauswirkungen der einzelnen Ressourcen wieder. Die Basis zur Bestimmung der Ressourcenfaktoren bildet eine Hierarchie von Ressourceneffizienz-Kriterien, welche auch im Rahmen des fünften Kapitels vorgestellt werden.

Die Anwendung der Methode thematisiert Kapitel 6. Dazu wird ein im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickeltes Softwaretool beschrieben, das den Einsatz der Methode in der Praxis unterstützt. Anschließend erfolgt eine Bewertung der Methode, indem diese an den eingangs gestellten Anforderungen gespiegelt wird. Außerdem werden der bei der Anwendung anfallende Aufwand sowie die vielfältigen Vorteile der Ressourceneffizienz-Bewertung aufgezeigt. Schließlich fasst Kapitel 7 die Inhalte der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche weitere Forschungstätigkeiten im Rahmen der behandelten Fragestellung.



## 2 Stand der Erkenntnisse

### 2.1 Allgemeines

Das Vorgehen bei einer ökologischen Bewertung orientiert sich grundsätzlich an der in der DIN 14040 (2006) und der DIN 14044 (2006) definierten Methode zur Ökobilanzierung. Das dort festgelegte Standardvorgehen hat sich in den 90er Jahren durchgesetzt und wird mittlerweile weltweit zur politischen, aber insbesondere auch zur unternehmerischen Entscheidungsunterstützung eingesetzt (GUINÉE ET AL. 2011, FINNVEDEN ET AL. 2009).

Im Folgenden werden zunächst die methodischen Grundlagen der Ökobilanzierung aufgezeigt (vgl. Abschnitt 2.2). Für alle Phasen der Ökobilanzierung werden die relevanten Grundsätze herausgearbeitet, die Gültigkeit für jede Form der ökologischen Analyse und Beurteilung haben und damit auch für die Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung von Bedeutung sind. Im Anschluss werden wissenschaftliche Arbeiten, die sich explizit auf die Anwendung in der Fertigung fokussieren, aufgeführt und bezüglich ihrer Eignung zur Bewertung der Ressourceneffizienz von Fertigungsprozessketten untersucht (vgl. Abschnitt 2.3).

## 2.2 Methodische Grundlagen der Ökobilanzierung

### 2.2.1 Phasen einer Ökobilanz

Laut DIN 14040 (2006) bezieht sich die Ökobilanz „auf die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen (z. B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen)“ während des ressourcenorientierten Produktlebenszyklus. Die Phasen der Ökobilanz gliedern sich, wie in Abbildung 9 dargestellt, in die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, das Erstellen der Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung sowie die Auswertung.

Bei der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens werden die Systemgrenze, der Detaillierungsgrad der Untersuchung sowie ein Referenzobjekt, die sogenannte funktionelle Einheit, definiert. In der Phase der Sachbilanzierung werden die durch die Systemgrenze festgelegten Input- und Output-Ressourcenströme jeweils bezogen auf die funktionelle Einheit quantifiziert. Im Anschluss wird aufbauend auf den Sachbilanzdaten im Rahmen der Wirkungsabschätzung eine Anreicherung mit Zusatzinformationen zu Umweltwirkungen durchgeführt. Abschließend erfolgt die Auswertung der Ergebnisse aus Sachbilanz und Wirkungsabschätzung. Die Phasen der Ökobilanzierung beeinflussen sich gegenseitig, was durch die Doppelpfeile in Abbildung 9 ausgedrückt wird.

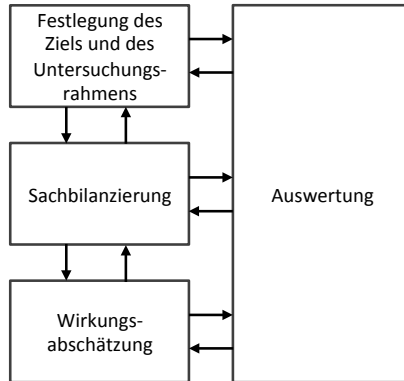


Abbildung 9: Phasen einer Ökobilanz in Anlehnung an DIN 14040 (2006)

Aus diesem grundlegenden Vorgehen ergeben sich folgende allgemeine Grundsätze für die Erstellung einer Ökobilanz (DIN 14040 2006):

- **Lebenswegbetrachtung:** Es soll der gesamte ressourcenorientierte Lebensweg eines Produkts betrachtet werden, d. h. von der Ressourcengewinnung bis zum End of Life, um mögliche Verlagerungen von Umweltbelastungen berücksichtigen zu können.
- **Umweltbezogene Ausrichtung:** Der Fokus der Untersuchungen soll auf den Umweltaspekten und -wirkungen liegen. Soziale und ökonomische Aspekte sollen nicht betrachtet werden.
- **Relativer Ansatz und funktionelle Einheit:** Alle Untersuchungen sollen sich auf die funktionelle Einheit beziehen. Es handelt sich bei einer Ökobilanz demnach immer um einen relativen Ansatz.
- **Iterativer Ansatz:** Bei Untersuchungen einer Phase der Ökobilanzierung sollen immer auch die Ergebnisse der anderen Phasen berücksichtigt werden, um die Vollständigkeit und Konsistenz der Ergebnisse zu gewährleisten.
- **Transparenz:** Bei den i. d. R. komplexen Untersuchungen soll stets auf Transparenz geachtet werden.
- **Ganzheitlichkeit:** Es sollen alle Aspekte der natürlichen Umwelt, der menschlichen Gesundheit und der Ressourcen einbezogen werden, um zusätzlich mögliche Wechselwirkungen zu identifizieren.

- **Priorität des wissenschaftlichen Ansatzes:** Die Entscheidungen, die im Rahmen einer Ökobilanz getroffen werden, sollen auf wissenschaftlichen Ansätzen beruhen. Bevorzugt sollen naturwissenschaftliche Ansätze herangezogen werden, aber auch der Einsatz von Methoden aus den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften ist möglich.

Ausgehend von diesen Grundsätzen werden in den folgenden Abschnitten die einzelnen Phasen der Ökobilanzierung (vgl. Abbildung 9) und die Aufgaben, die im Rahmen jeder Phase anfallen, näher erläutert.

## 2.2.2 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

### 2.2.2.1 Phasenspezifische Aufgaben

Im Rahmen der Zielsetzung einer Ökobilanz werden die beabsichtigte Anwendung und die Gründe für die Durchführung der Studie vorgegeben. Weiterhin wird festgelegt, an wen sich die Ergebnisse der Studie richten sollen, und ob vergleichende Aussagen getroffen werden (DIN 14040 2006). Tabelle 3 stellt zwei grundlegende Aspekte einer Zieldefinition dar: zum einen, ob es sich um eine Ökobilanz zur Entscheidungsunterstützung handelt und zum anderen, ob die Auswirkungen auf andere Systeme neben dem analysierten Produktsystem berücksichtigt werden. Aus dieser Strukturierung ergeben sich drei relevante Fälle für den Einsatz einer Ökobilanz: die Entscheidungsunterstützung auf Mikro-Ebene, die Entscheidungsunterstützung auf Meso-/Makro-Ebene und die reine Bilanzierung (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Struktur zur Einordnung grundsätzlicher Ziele für eine Ökobilanz nach EUROPÄISCHE KOMMISSION (2010a, S. 38)

Entscheidungsunterstützung	Veränderungen in anderen Systemen	
	keine bis kleine	große
ja	Entscheidungsunterstützung Mikro-Ebene	Entscheidungsunterstützung Meso-/Makro-Ebene
nein	reine Bilanzierung	

Auf Basis dieser Überlegungen lassen sich das Untersuchungsobjekt, die funktionelle Einheit, die Systemgrenze sowie die Anforderungen an die Daten und deren Qualität ableiten. Auch die gewählte Methode und die relevanten Parameter für die Wirkungsabschätzung sollten in dieser Phase bereits festgelegt werden.

Die Studie sollte so spezifiziert werden, dass alle relevanten Informationen inbegriffen sind und gleichzeitig alle nicht benötigten Informationen ausgeschlossen werden. Entscheidungen über die Berücksichtigung oder Vernachlässigung von Informationen sollten bewusst getroffen und begründet werden (TODD & CURRAN 1999, S. 8).

Diese Aufgabe wird insbesondere durch die Festlegung eines Vordergrund- (engl.: foreground)<sup>6</sup> und eines Hintergrundsystems (engl.: background) unterstützt. Das *Vordergrundsystem* umfasst die wichtigsten Elemente, deren Ressourcenströme für die Ökobilanz aufgestellt werden müssen. Weiterhin werden aus einer Entscheidungsperspektive die Elemente als Vordergrundsystem verstanden, auf die im Rahmen der Entscheidung direkt Einfluss genommen werden kann. Das *Hintergrundsystem* liefert Energie und Material an das Vordergrundsystem. Bei den Elementen des Hintergrundsystems ist es dem Entscheider allerdings nicht möglich, diese direkt zu beeinflussen (CURRAN 2006, S. 10, EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010a, S. 96 ff.). Zudem sind alle Systeme in die Öko- und Technosphäre eingebettet, wobei Ströme über deren Systemgrenzen hinweg in der Ökobilanzierung von besonderer Bedeutung sind. Die *Ökosphäre* umfasst den durch die Gesamtheit der Ökosysteme aufgespannten Raum (STERR & LIESEGANG 2003, S. 18). Die *Technosphäre* ist ein Teilbereich der Ökosphäre, der vom Menschen hergestellte oder veränderte Dinge beinhaltet (STERR & LIESEGANG 2003, S. 25). Einen Überblick über die unterschiedlichen Systemgrenzen bietet Abbildung 10.

In dieser ersten Phase der Ökobilanzierung wird außerdem entschieden, ob eine attributive (engl.: attributional) oder handlungskonsequenzorientierte (engl.: consequential) Ökobilanz durchgeführt werden soll. Eine *attributive* Ökobilanz umfasst alle relevanten Ressourcenströme, die einem Untersuchungsobjekt zugeordnet werden und innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls fließen. *Handlungskonsequenzorientierte* Ökobilanzen zeigen auf, wie sich Ressourcenflüsse aus makroökonomischer Sicht aufgrund einer Entscheidung verändern. Hauptanwendungsgebiet für handlungskonsequenzorientierte Ökobilanzen ist die Untersuchung ökologischer Auswirkungen von gesetzlichen Vorgaben oder von strategischen Unternehmensentscheidungen, wie beispielsweise die Einführung eines neuen Produkts oder die Unterzeichnung eines langjährigen Liefervertrags (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010a, S. 177).

Zusätzlich kann zwischen retrospektiven und prospektiven Ökobilanzen unterschieden werden. *Retrospektive* Ökobilanzen bilden bestehende Systemgegeben-

---

<sup>6</sup> Die Begrifflichkeiten werden im Folgenden z. T. auch auf Englisch angegeben, um eine Referenzierung zu vereinfachen, da in manchen Fällen die Definition der korrespondierenden deutschen Begriffe in der Fachliteratur nicht eindeutig ist.

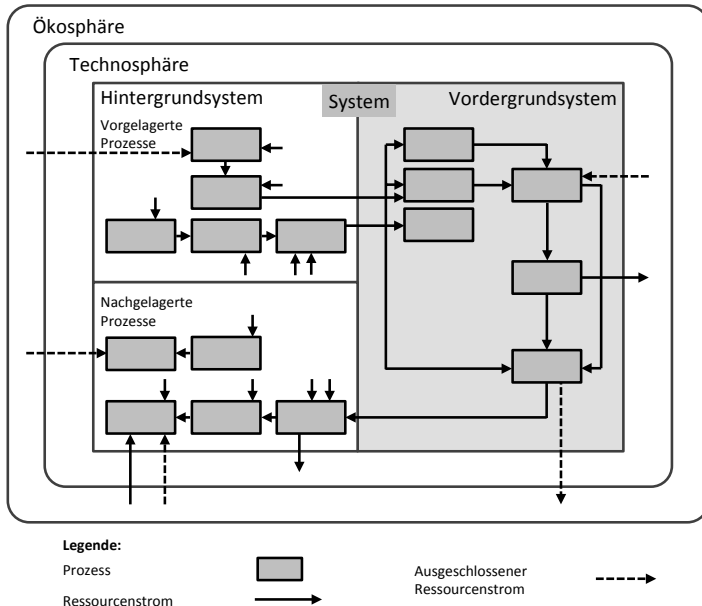


Abbildung 10: Systemgrenzen einer Ökobilanz in Anlehnung an die EUROPÄISCHE KOMMISSION (2010a, S. 99)

heiten oder bereits eingetretene Änderungen aufgrund von Entscheidungen ab, während *prospektive* Ökobilanzen zukünftige Gegebenheiten und Variationen geplanter Systeme widerspiegeln (CURRAN ET AL. 2005).

### 2.2.2.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit bestimmt als Referenzgröße, wie die Daten einer Ökobilanz quantifiziert und strukturiert werden. Sie ist die Einheit, auf die sich alle Input- und Outputdaten beziehen und wirkt sich direkt auf die Genauigkeit der Studie sowie die Aussagekraft der Ergebnisse aus. Bei Vergleichen unterschiedlicher Systeme ist die Wahl der funktionellen Einheit von zentraler Bedeutung. Insbesondere die Funktion des bewerteten Produkts oder Prozesses muss bei der Festlegung der funktionellen Einheit adäquat berücksichtigt werden und für die alternativen Systeme identisch definiert sein (CURRAN 2006, S. 11, DIN 14044 2006). Beispielsweise lautet eine sinnvolle Definition einer funktionellen Einheit für den Vergleich von Wandfarben: Benetzung von  $1 \text{ m}^2$

Außenwand mit einer Deckkraft von 99,9% für 10 Jahre (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010a, S. 60). Bei der Analyse von Technologien oder Produktsystemen ist eine Kombination von technischem Verständnis und Expertise im Bereich der Ökobilanzierung unabdingbar, um die geeignete funktionelle Einheit für vergleichende Ökobilanzstudien festzulegen (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010a, S. 65).

### 2.2.2.3 Systemgrenze

Bei der Definition der Systemgrenze muss jedes Element des Produktlebenszyklus, sei es ein Prozess oder ein Produkt, berücksichtigt werden, dessen Ressourcenströmen ein Einfluss auf die Ökosphäre oder Technosphäre unterstellt wird. Systemgrenzen lassen sich einfacher definieren, wenn die Systemelemente in primäre und sekundäre Elemente unterteilt werden. *Primäre Elemente* tragen direkt zur Herstellung, Nutzung oder End of Life des Produkts bei. *Sekundäre Elemente* sind wiederum verantwortlich für die Herstellung, Nutzung oder End of Life der von den primären Elementen benötigten Ressourcen. Ist das betrachtete Produkt z. B. Seife, die zusätzlich Feuchtigkeitslotion enthält, so sind alle Inhaltsstoffe und Herstellungsprozesse der Seife primäre Elemente. Die Fertigungsprozesse und die Bestandteile der in die Seife eingehenden Feuchtigkeitslotion hingegen sind sekundäre Elemente. Diese Zusammenhänge lassen sich über mehrere Ebenen entwickeln, wobei sich die betrachteten Elemente immer weiter von den primären Systemelementen entfernen. Hierbei ist klar zu definieren, bis zu welcher Ebene die sekundären Elemente einbezogen werden müssen (CURRAN 2006, S. 13 f.). Darüber hinaus können zusätzlich genau spezifizierte Elemente ausgeschlossen werden. Wenn ein Element bei allen Alternativen dieselben Ressourcenströme aufweist, kann es bei der Betrachtung vernachlässigt werden (CURRAN 2006, S. 16). Diese Aufteilung in primäre und sekundäre Elemente sollte zu großen Teilen die Unterscheidung zwischen Vorder- und Hintergrundsystem widerspiegeln.

Die Festlegung der Systemgrenze hat neben der geforderten Datenqualität den größten Einfluss auf den erforderlichen Aufwand für eine Ökobilanzstudie. Wichtig sind daher die zu definierenden Abschneidekriterien, anhand derer sich ableiten lässt, ob ein Ressourcenstrom in die Betrachtung einbezogen wird oder nicht. Mögliche Abschneidekriterien sind z. B. Masse, Energie und Umweltrelevanz (DIN 14044 2006). Wird beispielsweise die Masse als Abschneidekriterium angesetzt, so werden nur die Inputströme aufgenommen, die mehr als einen bestimmten prozentualen Anteil des Masseninputs des Gesamtsystems ausmachen. Im englischsprachigen Raum werden unter dem Begriff *Streamlining* Ansätze zusammengefasst, die verschiedene Abschneidekriterien für eine Studie festlegen und damit den Aufwand reduzieren (WEITZ ET AL. 1996). HUNT



ET AL. (1998) führten umfangreiche Untersuchungen zu den Auswirkungen des Streamlinings von Ökobilanzen durch. In ihrer Arbeit verglichen sie das Bewertungsergebnis einer Ökobilanzstudie mit Streamlining mit dem einer vollständigen Ökobilanz. Folgende Varianten des Streamlinings wurden hierbei untersucht:

- Auslassen unterschiedlicher Phasen des Lebenszyklus
- Substituieren von Sachbilanzdaten und Daten zur Wirkungsabschätzung durch Ersatzdaten
- Partieller Einsatz von qualitativen und weniger genauen Daten
- Ausschluss definierter Ressourcen aus der Betrachtung

Schließlich konnten HUNT ET AL. (1998) aus den Untersuchungen ableiten, dass der in Abschnitt 2.2.1 geforderte Grundsatz der Lebenswegbetrachtung gültig ist und somit stets der gesamte Lebenszyklus betrachtet werden muss. Gleichzeitig zeigte sich, dass der Ersatz von Daten, die nicht direkt im Fokus der Ökobilanz stehen, durch qualitative und weniger genaue Daten von allen untersuchten Vereinfachungsansätzen die größte Konsistenz mit einer vollständigen Ökobilanzierung aufweist.

### 2.2.2.4 Allokation

Wenn ein Prozess mehr als ein Produkt herstellt, werden diese Produkte als Koppelprodukte bezeichnet. Soll ein bestimmtes Koppelprodukt bilanziert werden, müssen die Ressourcenströme des Prozesses auf die unterschiedlichen Koppelprodukte aufgeteilt werden. Ansätze zur sinnvollen Zuteilung der Ressourcen auf die Produkte werden unter dem Begriff Allokation zusammengefasst. Für diese Zuordnung bietet die DIN 14044 (2006) ein dreistufiges Verfahren:

- Schritt 1: Es ist grundsätzlich anzustreben, Allokationen zu vermeiden. Daher sollte der Versuch unternommen werden, Prozesse so weit zu unterteilen, dass die Ressourcenströme den Produkten eindeutig zugeordnet werden können.
- Schritt 2: Kann eine Allokation nicht vermieden werden, sollten die Ressourcenströme des Prozesses den unterschiedlichen Produkten auf Basis physikalischer Beziehungen zugeordnet werden. Die Aufteilung kann beispielsweise entsprechend des Verhältnisses der Produktmassen oder der Produktstückzahlen erfolgen.

- Schritt 3: Kann auch eine Allokation basierend auf physikalischen Größen nicht durchgeführt werden, sollten die Ressourcenströme anhand anderer Beziehungen aufgeteilt werden. Ein gängiges Vorgehen ist hierbei die Allokation gemäß des ökonomischen Werts des Produkts bzw. des Produktpreises.

Grundsätzlich ist für eine Ökobilanzstudie ein einheitliches Vorgehen bei der Allokation festzulegen, um damit die Konsistenz der Studie zu unterstützen und die Einschätzung der Ergebnisse zu erleichtern.

### **2.2.3 Sachbilanzierung**

#### **2.2.3.1 Phasenspezifische Aufgaben**

Nach der Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens der Ökobilanz werden im Rahmen der Sachbilanzierung zunächst die zu bilanzierenden Prozesse identifiziert und spezifiziert, um daraufhin die Daten zielgerichtet zu erheben und die Ressourcenströme zu quantifizieren. Bei der Datenerhebung wird festgelegt, welche Daten für die Quantifizierung der Ressourcenströme von in der Systemgrenze liegenden Prozessen benötigt werden und in welcher Qualität diese vorliegen müssen. Die Datenberechnung erfolgt im Anschluss an die Datenerhebung. Alle verwendeten Berechnungsvorschriften müssen hierbei explizit dokumentiert werden und der Bezug zu einem Prozess und der funktionalen Einheit muss vorhanden sein. Außerdem ist es möglich, dass im Rahmen der Sachbilanzierung eine iterative Anpassung der Systemgrenze vorgenommen werden muss, um beispielsweise Allokationen zu vermeiden oder irrelevante Elemente aus der Betrachtung auszuschließen. Die Sachbilanzierung ist meist die aufwändigste Phase einer Ökobilanz, da die Daten häufig gar nicht oder nicht in der erforderlichen Form vorliegen (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010a, S. 153 ff., CURRAN 2006, S. 17 ff.).

#### **2.2.3.2 Identifikation relevanter Elemente**

Die Identifikation von relevanten Elementen, d. h. von Prozessen und verwendeten Ressourcen, variiert abhängig davon, ob es sich um eine attributive oder um eine handlungskonsequenzorientierte Ökobilanz handelt (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010a, S. 154). Da im Rahmen dieser Arbeit mikroökonomische Entscheidungen auf Basis der Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung unterstützt werden sollen, beziehen sich die folgenden Ausführungen auf attributive Ökobilanzen.

Grundsätzlich sind alle Elemente des Lebenszyklus eines Produktsystems in die Betrachtung aufzunehmen, außer sie werden durch die Abschneidekriterien

oder aus anderen Gründen explizit ausgeschlossen (vgl. Abschnitt 2.2.2.3). Bei der genauen Betrachtung des Produktsystems treten allerdings Beziehungen von Teilproduktsystemen zum Gesamtproduktsystem oder Beziehungen von Gesamtproduktsystemen untereinander auf, die für eine korrekte Zuordnung relevanter Systemelemente wichtig sind. Bei der Beziehung eines Teilproduktsystems zu dem zugehörigen Gesamtproduktsystem kann die endgültige Funktion nur vom Gesamtproduktsystem zur Verfügung gestellt werden. Eine isolierte Betrachtung des Teilproduktsystems kann daher zur Vernachlässigung von relevanten Prozessen führen. Als Beispiel kann hierfür der Vergleich zweier Autobatterien angeführt werden. Diese sind ggf. unterschiedlich schwer und beeinflussen daher den Verbrauch des Autos in dessen Nutzungsphase unterschiedlich. Bei der isolierten Betrachtung der Batterien, liegt der Treibstoffverbrauch des Autos nicht innerhalb der Systemgrenze und würde damit nicht betrachtet. Im anderen Fall kann ein Gesamtproduktsystem Auswirkungen auf die Elemente eines anderen Gesamtproduktsystems in seiner Umgebung haben. Beispielsweise geben energiebetriebene Produkte Abwärme ab, die sich zum einen in einer Reduzierung des Verbrauchs eines heizenden Systems oder in der Erhöhung des Verbrauchs eines kühlenden Systems niederschlagen kann. Die Ressourcenströme der beeinflussten Elemente des Heiz- bzw. Kühlsystems sind deshalb bei der Bilanzierung des Gesamtproduktsystems, das die Abwärme liefert, zu berücksichtigen (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010a, S. 155 ff.).

Die Zuordnung von relevanten Elementen zu dem Untersuchungsobjekt einer Ökobilanzstudie ist daher komplex, wird jedoch nicht in der DIN 14044 (2006) ausgeführt. Als Abhilfe schlägt die EUROPÄISCHE KOMMISSION (2010a, S. 159 ff.) das in Abschnitt 2.2.2.3 im Rahmen der Festlegung der Systemgrenzen erwähnte Ebenen-Modell vor, um das Vorgehen bei der Identifikation der zu bilanzierenden Elemente zu unterstützen und führt dieses weiter aus. Es werden vier verschiedene Ebenen beschrieben, Ebene 0 bis Ebene 3, mit deren Hilfe eine einfachere Abgrenzung der unterschiedlichen Elemente ermöglicht werden soll:

- Ebene 0: Elemente des Vordergrundsystems, die in ihrer Funktion direkt die funktionelle Einheit zur Verfügung stellen. Diese Elemente können Prozesse oder Produkte sein, wie beispielsweise ein Fenster.
- Ebene 1: Elemente, die ganz oder teilweise in das analysierte Produkt eingehen, wie z. B. das Fensterglas und der Fensterrahmen. Die Elemente sind in diesem Fall immer Produkte.
- Ebene 2: Elemente, die die Ebene 0-Elemente nur tangieren, indem sie eine unterstützende Funktion ausführen. Als Beispiele hierfür sind die Heizung oder Klimaanlage anzuführen. Ebene 2-Elemente umfassen häufig

Beziehungen zwischen Teilproduktsystem und Gesamtproduktsystem, die beachtet werden sollten.

- Ebene 3: Elemente, die das Vordergrundsystem nicht tangieren, aber unterstützende Dienstleistungen zur Verfügung stellen, wie z. B. das Fensterputzen.

Zusätzlich kann eine Bilanzierung weiterer indirekter Elemente jenseits der Ebene 3 sinnvoll sein. Diese umfassen ausgewählte Elemente, die wiederum jeweils Ebene-0- bis Ebene-3-Elemente der bereits identifizierten relevanten Elemente sind. Die Kategorisierung der Elemente in die Ebenen ist ein iterativer Prozess, der so lange wiederholt werden sollte, bis alle wichtigen indirekten Elemente innerhalb der Systemgrenze liegen und in die Ökobilanzstudie eingehen.

### 2.2.3.3 Datenerhebung und -berechnung

Sind die zu bilanzierenden Elemente identifiziert, müssen die benötigten Daten zur Modellierung der Ressourcenströme und zur Durchführung der Wirkungsabschätzung gesammelt und aufbereitet werden. Um die Zielstellung einer Ökobilanzstudie hinreichend zu erfüllen, kann es notwendig sein, produkt- oder prozessspezifische Daten zu ermitteln. Für die Quantifizierung anderer Elemente und Umwelteffekte kann es hingegen sinnvoll sein, generische oder durchschnittliche Daten heranzuziehen (TODD & CURRAN 1999, S. 9 f.). Eine wichtige Aufgabe während der Sachbilanzierung ist es, nach jedem Schritt eine kritische Prüfung der Daten durchzuführen (DIN 14044 2006).

Laut DIN 14044 (2006) und TODD & CURRAN (1999, S. 9 f.) sollten für die Definition der erforderlichen Datenqualität u. a. Angaben zu Eigenschaften wie Unsicherheit, Datenquelle, Referenzzeitraum sowie zeitliche und geographische Gültigkeit gemacht werden. Die benötigten Dateneigenschaften leiten sich aus den Anforderungen der geplanten Analyse und Bewertungsaufgabe ab. Es ist wichtig, die benötigte Datenqualität bereits in der ersten Phase der Ökobilanz und damit vor der eigentlichen Datenerhebung festzulegen, um zu verhindern, dass die Definition der benötigten Daten und Datenqualität von deren Verfügbarkeit beeinflusst wird. Für die Bilanzierung von Elementen des Vordergrundsystems werden i. d. R. produkt- oder prozessspezifische Daten benötigt, die zudem die Möglichkeit liefern, gewisse Abhängigkeiten, z. B. bei Veränderung der funktionellen Einheit, abzubilden. Bei der Quantifizierung von Ressourcenströmen des Hintergrundsystems können häufig Durchschnittsdaten oder generische Daten verwendet werden, die z. T. stark aggregiert und vom spezifischen Produkt oder Prozess abstrahiert sind (CURRAN 2006, S. 10). Diese Daten werden i. d. R. bestehenden Datenbanken entnommen.

Es existieren zum einen internationale und nationale Datenbanken, die aus öffentlich geförderten Projekten hervorgegangen sind (z. B. UBA 2008, EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010b). Zum anderen haben einige Industrieverbände Datenbanken aufgebaut, die Sachbilanzdaten zu Tätigkeiten ihres Industriezweigs liefern (z. B. WORLD STEEL ASSOCIATION 2010, PLASTICSEUROPE 2011, EAA 2008). Neben den genannten Datenbanken, die größtenteils aggregierte Durchschnittsdaten enthalten und kostenlos verfügbar sind, gibt es kommerzielle Datenbanken, wie z. B. die Schweizerecoinvent-Datenbank, die z. T. prozessspezifische Daten zur Verfügung stellen. Dabei sind Qualität und Konsistenz von Daten aus Datenbanken zentrale Themen bei der Erstellung einer Sachbilanz, da der Anwender häufig keine Transparenz über etwaige Fehler und methodische Entscheidungen bei der Erfassung und Aufbereitung dieser Daten hat (FINNVEDEN ET AL. 2009).

Für die Berechnung im Rahmen der Sachbilanzierung wurden drei verschiedene Vorgehensweisen entwickelt. Es werden die prozessorientierte, die ökonomische Input-Output und die hybride Sachbilanz unterschieden. Bei der *prozessorientierten Sachbilanz* werden die Ressourcenströme der Elemente eines Produktsystems, die zur Erzeugung der funktionellen Einheit benötigt werden, in Form eines Fließbilds modelliert, wobei die Ströme als Ratio von Input zu Output angegeben werden. Diese Zusammenhänge können durch Matrizen dargestellt werden und erleichtern die Berechnung der Sachbilanzdaten. Die Bilanzgrenzen sind hierbei allerdings sehr eng zu setzen, da eine so aufwendige Modellierung nur für eine geringe Zahl an Elementen durchführbar ist (SUH & HUPPES 2005).

Beruhend auf der Erkenntnis, dass bei einer umfangreichen Bilanzierung von Systemen ganze Teile einer Volkswirtschaft berücksichtigt werden müssen, wurde federführend an der CARNEGIE MELLON UNIVERSITY (2008) basierend auf den Arbeiten von LEONTIEF (1970) die *ökonomische Input-Output-Sachbilanzierung* entwickelt. Dieser Ansatz stützt sich auf Daten des volkswirtschaftlichen Rechnungswesens und verknüpft diese mit ökologischen Umwelteffekten. Bei der Anwendung der ökonomischen Input-Output-Sachbilanz sind folgende Einschränkungen zu berücksichtigen (SUH & HUPPES 2005, REBITZER ET AL. 2004): Die errechneten Daten umfassen nur die Upstream-Elemente<sup>7</sup> des Produktsystems. Die Phasen der Nutzung und des End of Life werden nicht abgebildet. Außerdem enthalten die Daten eine größere Unsicherheit aufgrund der Heterogenität der Güterströme und sind zu grob, um Vergleiche zwischen ähnlichen Produkten oder Prozessen anzustellen. Zudem ist anzumerken, dass die Datenbasis der ökologischen Umwelteffekte von Nationen z. T. nicht vorhanden, veraltet oder von geringer Qualität sind (SUH & HUPPES 2005).

---

<sup>7</sup> Upstream-Elemente bezeichnen Elemente aus dem aktuellen Prozess vorgelagerten Prozessen. Analog sind Downstream-Elemente, die Elemente aus dem aktuellen Prozess nachgelagerten Prozessen.

Die *hybride Sachbilanz* vereint die Ansätze der prozessorientierten und der ökonomischen Input-Output-Sachbilanz. Für das Vordergrundsystem und die Downstream-Elemente des Hintergrundsystems wird eine prozessorientierte Sachbilanz erstellt und für die Upstream-Elemente des Hintergrundsystems werden die Daten der ökonomischen Input-Output-Sachbilanz entnommen. Der Definition der Grenze zwischen den unterschiedlichen Sachbilanzarten sollte besondere Beachtung entgegengebracht werden, da eine Verknüpfung von Elementen über die Grenze hinweg nicht möglich ist und die Gefahr einer Doppelzählung von Elementen besteht (SUH & HUPPES 2005).

### 2.2.4 Wirkungsabschätzung

#### 2.2.4.1 Einordnung in die ökologischen Bewertungsmethoden

Aufbauend auf einer Analyse der Ressourcenströme des betrachteten Produktsystems findet die ökologische Bewertung statt. Die Wirkungsabschätzung nach DIN 14040 (2006) ist hierbei nur eine Methode aus der Vielzahl an Vorgehen, die zur ökologischen Bewertung entwickelt wurden. Um die Wirkungsabschätzung einzuordnen und von anderen Ansätzen abzugrenzen, wird im Folgenden ein kurzer Überblick über Kategorien existierender Verfahren gegeben. Es ist anzumerken, dass eine so umfangreiche Sachbilanzierung, wie sie von der DIN 14044 (2006) gefordert wird, nicht für alle Methoden benötigt wird.

Die Methoden zur ökologischen Bewertung können in verbal argumentative, relativ abstufende, monetäre und naturwissenschaftlich orientierte Ansätze untergliedert werden. Die bekannteste Form der *verbal argumentativen Bewertung* stellen Umweltberichte dar. Darin werden quantitative und qualitative Daten, die sich auf Emissionen, Ressourcen, Produkte und Prozesse beziehen, kommentiert und auf verschiedene Weise analysiert (STEVEN ET AL. 1997, S. 34 ff., VOLK 2001, S. 659 ff.). Zur *relativ abstufenden Bewertung* zählen alle Methoden, die sich nicht nur auf eine verbal argumentative Beurteilung der Umweltauswirkungen beschränken, sondern eine ordinale Bewertung vornehmen. In diesem Zusammenhang findet z. B. die ABC/XYZ-Methode Anwendung (STEVEN ET AL. 1997, S. 36 ff., VOLK 2001, S. 227 ff.). Die *monetäre Bewertung* erfasst die Umweltbelastung in Geldeinheiten. Umweltrelevante Kosten beinhalten beispielsweise Vermeidungskosten für Emissionen, Entsorgungskosten für Abfälle und Sanierungskosten für kontaminierten Boden, die alle real für ein Unternehmen anfallen (VOLK 2001, S. 505 ff.). Möglich ist in diesem Zusammenhang auch, die Zahlungsbereitschaft für die Wiedergutmachung von Umweltbelastungen durch eine Befragung festzustellen (STEEN 1999, S. 17). Ein weiterer Ansatz der monetären Bewertung aus dem Gebiet der Volkswirtschaftslehre ist die Internalisierung externer Effekte. Als externe Effekte werden

Auswirkungen bezeichnet, die einzelne Personen oder Unternehmen verursachen, jedoch von der Allgemeinheit getragen werden müssen und als theoretische Kosten für die Nutzung öffentlicher Güter angesetzt werden (STEVEN ET AL. 1997, S. 39 ff., WIESMETH 2002, S. 69 ff.). Die *naturwissenschaftlich orientierten Ansätze* führen die Bewertung der Umweltauswirkungen auf naturwissenschaftlich begründbare Zusammenhänge wie die Knappheit der Ressourcen oder die begrenzte Aufnahmefähigkeit der Umweltmedien zurück. Eine Sachbilanzierung des Betrachtungsobjekts nach DIN 14044 (2006) ist eine notwendige Grundvoraussetzung für alle naturwissenschaftlich orientierten Bewertungsmethoden. Folgende weitere Unterteilung der naturwissenschaftlich orientierten Ansätze ist sinnvoll, um die Wirkungsabschätzung entsprechend einzuordnen:

- Grenzwertorientierte Methoden
- Ressourcenverbrauchsorientierte Methoden
- Flächenorientierte Methoden
- Auswirkungsorientierte Methoden

Die *grenzwertorientierten Verfahren* konzentrieren sich i. d. R. auf die Emissionen in Luft, Wasser und Boden. Die Bewertung basiert auf nationalen oder internationalen Zielen des Umweltschutzes. Hierzu werden verschmutzte Volumina mit einer national festgelegten kritischen Konzentration verglichen und normiert. Die Methode strebt an, die verschiedenen Umwelteinwirkungen zu aggregieren, damit schließlich anhand einer Kennzahl ein Vergleich gezogen werden kann.

Als *ressourcenverbrauchsorientiertes Verfahren* entspricht der in der VDI 4600 (2012)<sup>8</sup> definierte kumulierte Energieaufwand dem gesamten primärenergetisch bewerteten Aufwand, der während des Produktlebenszyklus entsteht. Die Berechnungen basieren auf Bereitstellungsnutzungsgraden für Primärenergieträger und elektrischen Strom, die sich aus dem Verhältnis von ressourcenspezifischen Heizwert oder elektrischer Arbeit zum kumulierten Energieaufwand ergeben. Das Konzept des Materialinputs pro Serviceeinheit (MIPS) berechnet zunächst die Materialintensität einer Serviceeinheit. Diese entspricht dem absoluten Masseninput über den Produktlebenszyklus. Eine Serviceeinheit ist dabei ein Produkt oder eine Dienstleistung, die zur Verfügung gestellt wird. Der absolute Masseninput, der sogenannte ökologische Rucksack, umfasst alle Input-Materialströme der benötigten Bestandteile der Serviceeinheit inklusive deren Vorprodukte und aller z. B. während der Rohstoffgewinnung bewegten Massen.

---

<sup>8</sup> Die VDI 4600 (2012) ist die neue, leicht veränderte Fassung der VDI 4600 (1997).

Dieser Input wird in fünf Kategorien unterteilt: abiotische und biotische Rohmaterialien, Bodenbewegung, Wasser und Luft. Zu den abiotischen Rohmaterialien werden auch die Primärenergieträger gezählt, die für den Energieverbrauch angesetzt werden. Abfallströme und sonstige Outputs werden hierbei nicht berücksichtigt. Nach der Aggregation aller Inputs unabhängig von der Materialart erfolgt eine Normierung mittels Division durch die Serviceeinheit (RITTHOFF ET AL. 2002, SCHMIDT-BLEEK & BEHRENSMEIER 1998). Analog zu den bereits erwähnten ressourcenverbrauchsorientierten Ansätzen wird bei dem Modell des virtuellen Wassers der gesamte Frischwasserverbrauch über den Lebenszyklus eines Produkts summiert und als Bewertungskennzahl herangezogen. Entwickelt wurde das Konzept von ALLAN (1998), um auf die politischen und ökonomischen Möglichkeiten des Imports von virtuellem Wasser in Form von Produkten in trockene Regionen hinzuweisen.

*Flächenorientierte Methoden* messen die Land- und Wasserflächen, die zur Erneuerung von Ressourcen und für den Abbau von Abfällen und Emissionen benötigt werden. Der in Abschnitt 1.1 angeführte ökologische Fußabdruck ist ein Repräsentant der flächenorientierten Methoden. Grundsätzlich werden für verschiedene Flächenkategorien der Erde jeweils die produzierten Energie- und Rohstoffmengen pro Hektar berücksichtigt. Der globale Hektar ist der resultierende Referenzwert, der die weltweit durchschnittliche biologische Produktivität pro Hektar beschreibt (KROTSHECK & NARODOSLAWSKY 1996, WACKERNAGEL & REES 1996).

*Auswirkungsorientierte Methoden* konzentrieren sich auf die ökologischen Implikationen der in der Sachbilanz ermittelten Ressourcenströme. Die auswirkungsorientierten Ansätze finden i. d. R. in der Wirkungsabschätzung nach DIN 14040 (2006) und DIN 14044 (2006) ihre Anwendung<sup>9</sup>. Im Folgenden werden das allgemeine Vorgehen und ausgewählte Ansätze näher beschrieben.

### 2.2.4.2 Phasenspezifische Aufgaben

Der Zweck der Wirkungsabschätzung ist es, zusätzliche Informationen zu generieren, um die Ergebnisse der Sachbilanz und die ökologischen Implikationen besser einschätzen zu können. Daher muss die Wirkungsabschätzung sorgfältig geplant und mit den vorhergehenden Phasen der Ökobilanzierung abgestimmt werden, um eine aussagekräftige Bewertung zu gewährleisten. Folgende Schritte

---

<sup>9</sup> In manchen Fällen werden auch andere Ansätze der ökologischen Bewertung für die Wirkungsabschätzung herangezogen, wie z. B. die Methode der ökologischen Knappheit als grenzwertorientiertes Verfahren (vgl. Abschnitt 2.2.4.5).



sind verbindliche Bestandteile zur Erstellung einer Wirkungsabschätzung gemäß DIN 14044 (2006):

- Die Wirkungskategorien (z. B. Klimaänderung), die zugehörigen Wirkungsindikatoren (z. B. Verstärkung der Infrarotstrahlung) und deren Charakterisierungsmodelle (z. B. globales Erderwärmungsszenario „Baseline“ über 100 Jahre des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) sowie die Wirkungsendpunkte werden ausgewählt. Diese bilden gemeinsam den sogenannten Umweltwirkungsmechanismus. Die Umweltrelevanz stellt eine Abschätzung der Einflussintensität eines Wirkungsindikators auf einen Wirkungsendpunkt dar (vgl. Abbildung 11).
- Die Sachbilanzergebnisse werden den ausgewählten Wirkungskategorien zugeordnet (Klassifizierung).
- Die Wirkungsindikatorwerte (z. B. kg des CO<sub>2</sub>-Äquivalents je funktioneller Einheit) werden berechnet (Charakterisierung). Dies erfolgt über Multiplikation der Sachbilanzergebnisse mit den Charakterisierungsfaktoren (z. B. kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/kg Gas).

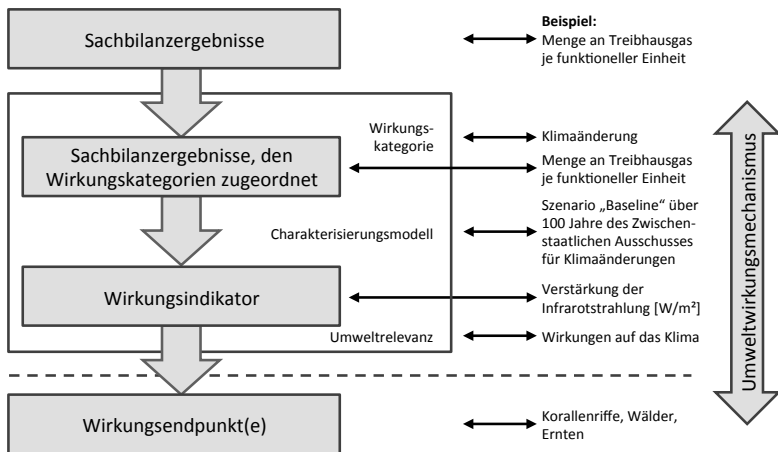


Abbildung 11: Umweltwirkungsmechanismus nach DIN 14044 (2006)

Außerdem können folgende Schritte als optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung durchgeführt werden (DIN 14044 2006):

- Die Größenordnung der Wirkungsindikatorwerte in Bezug auf Referenzinformationen wird berechnet (Normierung).

- Die Wirkungskategorien werden in eine oder mehrere Gruppen eingeteilt und es wird ggf. eine Rangfolge gebildet (Ordnung).
- Die Indikatorwerte werden über Wirkungskategorien hinweg unter Verwendung numerischer Faktoren, die auf Werthaltungen beruhen, umgewandelt und evtl. zusammengefasst (Gewichtung und Aggregation). Daten und Indikatorwerte vor der Gewichtung sollten immer zusammen mit den Gewichtungsergebnissen gezeigt werden, damit die enthaltene Wertung ersichtlich bleibt.

Zusätzlich sollte eine Analyse der Daten der Wirkungsabschätzung erfolgen, um die Signifikanz der Ergebnisse näher zu untersuchen und ggf. vernachlässigbare und besonders wirkintensive Elemente der Sachbilanz zu identifizieren. Dieser Schritt kann zu einer Anpassung des Untersuchungsrahmens und damit zu einer Änderung der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung führen (DIN 14044 2006).

Die Wirkungsabschätzung ist eine Disziplin in stetiger Entwicklung. Daher existieren seitens der Standardisierungsinstitutionen aktuell weder Vorgaben zu den anzuwendenden Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren, Charakterisierungsmodellen oder Wirkungsendpunkten noch zu einem präferierten Bewertungsansatz (FINNVEDEN ET AL. 2009, EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010c, S. 2). Im Folgenden wird daher ein kurzer Überblick über methodische Möglichkeiten und bestehende Ansätze gegeben, die für eine Wirkungsabschätzung zur Verfügung stehen.

### 2.2.4.3 Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle

Ein Wirkungsindikator für die jeweilige Wirkungskategorie kann nach DIN 14044 (2006) frei zwischen den Sachbilanzergebnissen und den Wirkungsendpunkten entlang des Umweltwirkmechanismus gewählt werden (vgl. Abbildung 11). Die Quantifizierung von Wirkungsindikatoren erfolgt mithilfe von Charakterisierungsmodellen, welche wissenschaftliche Ansätze zur Modellierung der Wirkung von emittierten Stoffen sind. Der Indikator für eine Wirkungskategorie wird durch Multiplikation des durch das Modell bestimmten Charakterisierungsfaktors mit den Sachbilanzergebnissen berechnet. Als allgemein anerkannte Gliederung der Wirkungsendpunkte haben sich die sogenannten *schützenswerten Bereiche* (engl.: areas of protection), bestehend aus der menschlichen Gesundheit (engl.: human health), dem Ökosystem (engl.: natural environment) und den natürlichen Ressourcen (engl.: natural resources), herauskristallisiert (HAES ET AL. 2002, S. 212, EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010d, S. 3). Hierbei ist anzumerken, dass die Definition der schützenswerten

Bereiche variiert, wobei sie in ihrer Gesamtheit mit dem in Abschnitt 1.2.2.1 eingeführten Verständnis von natürlichen Ressourcen übereinstimmen.

Bei der Wahl des Wirkungsindikators für eine Wirkungskategorie ist zwischen der sogenannten *midpoint*- und *endpoint*-Modellierung zu unterscheiden. Abbildung 12 zeigt eine Auswahl an existierenden Wirkungskategorien, die z. T. über *midpoint*- und *endpoint*-Modelle beschrieben werden können.

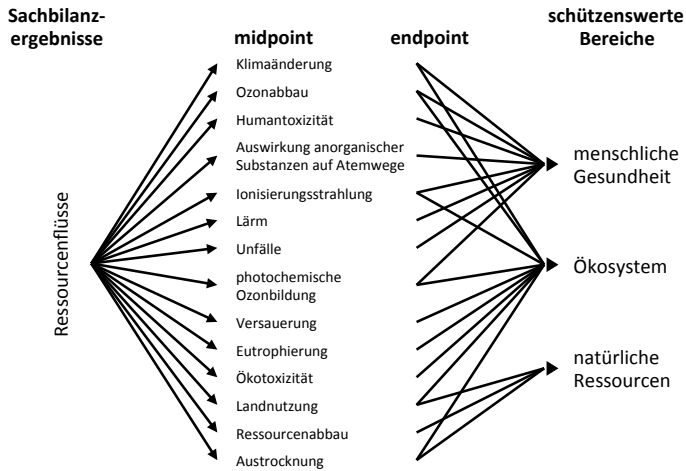


Abbildung 12: Auswahl an Wirkungskategorien und Wirkungsendpunkten nach EUROPÄISCHE KOMMISSION (2010d)

Die *midpoint*-Modellierung impliziert, dass der Wirkungsindikator irgendwo auf dem Umweltwirkungsmechanismus liegt, jedoch keinen Wirkungsendpunkt darstellt. Der Indikator wird typischerweise dort gewählt, wo eine weitere Modellierung als nicht sinnvoll erachtet wird, da sie entweder zu großen Unsicherheiten führt oder ein relativer Vergleich ohne weitere Modellierung möglich ist. Damit wird bei dieser Modellierungsweise nur ein Teil des Umweltwirkungsmechanismus wiedergegeben (FINNVEDEN ET AL. 2009). Bei der *endpoint*-Modellierung ist der Indikator selbst ein Wirkungsendpunkt und zeigt die Auswirkungen auf die schützenswerten Bereiche auf. Hierbei muss der komplette Umweltwirkungsmechanismus abgebildet werden, was im Bereich der Umweltrelevanz i. d. R. mit großer Unsicherheit behaftet ist. Häufig werden außerdem nicht alle Wirkungsendpunkte mit einbezogen, da entweder nicht genug Wissen über die Wirkweise vorhanden ist oder wissenschaftlich nicht bestätigt ist, ob überhaupt eine Wirkung besteht (FINNVEDEN ET AL. 2009). Nachdem beide Arten an

Wirkungsindikatoren Vor- und Nachteile aufweisen, ist es häufig zielführend, beide bei einer Wirkungseinschätzung einzusetzen, was im Rahmen einer *gemischten Modellierung* erfolgt (BARE ET AL. 2000).

In den letzten Jahren hat die Berücksichtigung der zeitlichen und örtlichen Differenzierung, die z. T. von den existierenden generischen Charakterisierungsmodellen nicht erfüllt wird, zu einer Erhöhung der Komplexität geführt. Bei Wirkungskategorien, wie z. B. der Versauerung des Bodens, sollten lokale oder regionale und nicht globale Charakterisierungsmodelle zur Anwendung kommen, da die Wirkung von Region zu Region verschieden ist. Auch für die zeitliche Wirkung gibt es unterschiedliche Charakterisierungsmodelle, da beispielsweise die Auswirkung eines Treibhausgases auf die Klimaerwärmung nach 20, 100 und 500 Jahren variiert. Bei der Gestaltung einer Wirkungsabschätzung ist daher zwischen der Genauigkeit der Abbildung der Umweltwirkungen und dem dafür aufzubringenden Aufwand abzuwägen (HAES ET AL. 2002, S. 6 f.).

### 2.2.4.4 Normierung, Ordnung und Gewichtung

Die Normierung setzt das Ausmaß der Wirkung unterschiedlicher Wirkungskategorien in Relation, indem sie diese mit Referenzwerten in Beziehung setzt und dadurch die Vergleichbarkeit durch Auflösung der Einheitenproblematik sicherstellt. Sie ist meist eine Vorstufe und liefert den Input für eine anschließende Ordnung und Gewichtung. Es existieren verschiedene Normierungsverfahren, wobei sich externe und interne Ansätze unterscheiden lassen. Die *externe* Normierung kann als Feststellung des relativen Beitrags einer Wirkungskategorie verstanden werden. Sie erfordert die Festlegung eines allgemeinen, extern gegebenen Referenzsystems, das die Vergleichbarkeit in einem größeren Kontext gewährleistet. Bei der *internen* oder auch fallspezifischen Normierung werden die Daten miteinander ins Verhältnis gesetzt. Diese Form der Normierung dient hauptsächlich der Verrechnung der Einheiten als Grundlage für die anschließende Gewichtung (HAES ET AL. 2002, S. 181 ff.).

Die Zuweisung von Wirkungskategorien zu unterschiedlichen Gruppen wird Ordnung genannt. Diese kann auch das Einsortieren auf einer ordinalen Skala umfassen. Auf Basis einer erstellten Rangfolge ist eine erste Beurteilung anhand der besonders wichtigen Kategorien möglich (HAES ET AL. 2002, S. 184 f.).

Bei der Gewichtung werden im Allgemeinen Gewichtungsfaktoren im Rahmen einer Forumbefragung (engl.: panel) bestimmt, die den Beitrag der Wirkungskategorie zur gesamten Umweltwirkung ausdrücken. Die Durchführung einer Gewichtung in der Phase der Wirkungsabschätzung ist Inhalt kontroverser Diskussionen, da hierdurch verstärkt Werthaltungen in die Ökobilanz integriert werden (HAES ET AL. 2002, S. 177 ff., FINNVEDEN ET AL. 2009). CURRAN

(2006, S. 52) argumentiert hingegen, dass eine Gewichtung sinnvoll ist, da die Wirkungskategorien die Ziele der Studie und die Werte der Interessengruppen widerspiegeln sollten. Bisher hat sich noch keine allgemeine Gewichtungsmethode durchgesetzt, die im Rahmen einer Wirkungsabschätzung zur Anwendung kommt. Unterstützt wird diese Aussage durch eine Studie von HAES ET AL. (2002, S. 192 ff.) zur Bewertung bestehender Gewichtungsansätze anhand eines Kriteriensystems, welche zu dem Schluss kommt, dass keine der Methoden alle Kriterien hinreichend erfüllt. Nichtsdestotrotz erfolgt in der Praxis i. d. R. eine Gewichtung (HANSEN 1999), da diese notwendig ist, um die Ergebnisse auf eine handhabbare Anzahl von Ergebnisgrößen zusammenzufassen und damit für eine Entscheidung nutzbar zu machen (LUNDIE & HUPPES 1999). FINNVEDEN ET AL. (2009) fordern daher eine verstärkte Weiterentwicklung und Veröffentlichung von Gewichtungsmethoden für den Einsatz in der Wirkungsabschätzung.

#### 2.2.4.5 Bestehende Ansätze zur Wirkungsabschätzung

Es existieren mehrere Ansätze zur Wirkungsabschätzung bzw. ökologischen Bewertung. Diese nutzen unterschiedlichste Kategorien und Charakterisierungsmodelle sowie Normierungs- und Gewichtungsvorgehen. Für einen groben Überblick lassen sich die Ansätze zum einen über die Art (midpoint oder endpoint) und Anzahl der Kategorien beschreiben, zum anderen über die angewandten Normierungs- und Gewichtungsschritte. Die bekanntesten bestehenden Methoden fasst Tabelle 4 auf Basis einer von der Europäischen Kommission durchgeführten Analyse zusammen (vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION (2010c)).

Tabelle 4: Überblick über existierende Ansätze zur Wirkungsabschätzung in Anlehnung an EUROPÄISCHE KOMMISSION (2010c)

Methoden	midpoint-/endpoint-Indikatoren	Anzahl Kategorien	Normierung und Gewichtung	Besonderheiten	Quelle(n)
<b>CML 2002</b>	midpoint	●	●	wissenschaftliche Basis	GUINÉE ET AL. (2002)
<b>Eco-indicator 99</b>	endpoint	●	●	drei fixe Präferenzansätze	GOEDKOOP & SPIRENSMA (2001)
<b>EDIP 2003</b>	midpoint	●	●	Indikatoren spät im Umweltwirkungsmechanismus	POTTING & HAUSSCHILD (2005), HAUSSCHILD & POTTING (2005)

<b>EPS 2000</b>	endpoint	●	◐	monetärer Ansatz	STEEN (1999)
<b>Impact 2002+</b>	gemischt	●	◐	für vergleichende Bewertung entwickelt	JOLLIET ET AL. (2003)
<b>Methode der ökologischen Knappheit</b>	endpoint	◐	●	grenzwertorientiertes Verfahren	FRISCHKNECHT ET AL. (2008)
<b>TRACI</b>	midpoint	◐	○	USA-spezifisch	BARE ET AL. (2002)

○ weniger als 5 Kategorien / weder Normierung noch Gewichtung  
 ◐ zwischen 5 und 15 Kategorien / Normierung  
 ● mehr als 15 Kategorien / Normierung und Gewichtung

### 2.2.5 Auswertung

Nach DIN 14044 (2006) werden bei der Auswertung als letzte Phase einer Ökobilanz folgende Schritte durchlaufen:

- Identifikation der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung
- Bewertung der Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz von Ergebnissen und Methode
- Ziehen von Schlussfolgerungen

Zunächst sollte in der Auswertungsphase sichergestellt werden, dass die Ergebnisse der Sachbilanzierung und der Wirkungsabschätzung dem Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie entsprechen. Ist dies der Fall, so können die Ergebnisdaten mithilfe einer Beitragsanalyse (Haben gewisse Prozesse oder Lebenszyklusphasen eine besondere Relevanz bezogen auf das Gesamtergebnis?) oder einer Abweichungsanalyse (Unterscheiden sich gewisse Ergebnisse stark von den Erwartungen oder bisherigen Erfahrungen?) untersucht und signifikante Punkte herausgearbeitet werden (CURRAN 2006, S. 55).

Eine wichtige Aufgabe ist die Überprüfung der Vollständigkeit der Daten. Werden hier Mängel entdeckt, müssen Anstrengungen unternommen werden, Datenlücken zufriedenstellend zu schließen. Ist dies nicht möglich, so muss die Datenlücke explizit in der Auswertung aufgeführt und in den Schlussfolgerungen berücksichtigt werden, da sich diese stark auf die Vergleichbarkeit

der Ergebnisse auswirkt. Die Sensitivität signifikanter Ergebnisse sollte im Rahmen einer Analyse untersucht werden. Dies trifft insbesondere auf mit hoher Unsicherheit behaftete Daten zu. Die Konsistenzprüfung analysiert, ob die Annahmen, Methoden und Daten einheitlich in der Studie zur Anwendung kamen und ob die definierte Systemgrenze berücksichtigt wurde. In manchen Fällen lassen sich gewisse Inkonsistenzen nicht vermeiden. Diese sollten wiederum bei den Schlussfolgerungen beachtet werden (CURRAN 2006, S. 56 f.).

Haben alle Untersuchungen zu zufriedenstellenden Ergebnissen geführt, können entsprechende Schlussfolgerungen gezogen und ggf. Empfehlungen ausgesprochen werden. Es ist wichtig, dass die Auswertung und nicht die Wirkungsabschätzung die letzte Phase der Ökobilanz darstellt, da die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung nicht notwendigerweise den Empfehlungen der gesamten Ökobilanzstudie entsprechen (HAES ET AL. 2002, S. 178 ff.).

### 2.3 Ansätze zur Ökobilanzierung in der Fertigung

#### 2.3.1 Untergliederung der bisherigen Arbeiten

Bisher wurde eine Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten erstellt, die sich direkt oder indirekt mit der Ökobilanzierung in der Fertigung beschäftigen. Um einen für die Themenstellung der vorliegenden Arbeit geeigneten Überblick zu ermöglichen, wurden die bisherigen Ansätze in verfahrensspezifische und verfahrensübergreifende Ansätze untergliedert. Die verfahrensspezifischen Ansätze setzen sich i. d. R. mit einem speziellen Fertigungsverfahren auseinander, das auf einem bestimmten Betriebsmittel ausgeführt wird. Arbeiten, die sich mit einem für unterschiedliche Fertigungsverfahren gültigen Vorgehen zur Sach- oder Ökobilanzierung befassen, werden im Rahmen der verfahrensübergreifenden Ansätze aufgeführt.

#### 2.3.2 Verfahrensspezifische Sach- und Ökobilanzen

Um einen schnellen Überblick über die verfahrensspezifischen Arbeiten zu ermöglichen, sind im Folgenden die prozessspezifischen Studien nach Hauptgruppen der DIN 8580 (2003) zusammengestellt. Die Studien unterscheiden sich i. d. R. hinsichtlich deren Zielsetzung, der Berücksichtigung der Umweltauswirkungen, der analysierten Betriebsmittel, der betrachteten Ressourcen sowie des gewählten Detaillierungsgrads.

**Urformen.** Im Bereich der urformenden Fertigungsverfahren wurden bislang hauptsächlich branchenübergreifende Daten zur Ökobilanzierung zusammengestellt (WORLD STEEL ASSOCIATION 2010, PLASTICS EUROPE 2011, EAA 2008).

Zusätzlich existieren einige prozessbezogene Sachbilanzstudien zum Laserstrahlschmelzen bzw. -sintern (KELLENS ET AL. 2010a, b, DUFLOU & KELLENS 2010, DUFLOU ET AL. 2011). BRANHAM ET AL. (2008) stellen einen Vergleich im Bereich des Gießens an, bei dem das Erhitzen von Stahl in einem Kupolofen mit dem in einem Induktionsofen verglichen wird.

**Umformen.** Bei den umformenden Fertigungsverfahren wurden bereits Studien zu Biege-, Schmiede- und Ringwalzprozessen durchgeführt. Diese Studien konzentrieren sich alle auf den Energieverbrauch. Ihnen liegen jedoch unterschiedliche Analyseansätze zu Grunde. Hierbei betrachten SANTOS ET AL. (2011) den Prozess und dessen Optimierung, DEVOLDERE ET AL. (2007) analysieren den Energieverbrauch des Betriebsmittels je nach Maschinenzustand und STIENS (2000) untersucht den kumulierten Energieaufwand umformender Prozesse.

**Trennen.** Infolge der Erweiterung der europäischen Richtlinie zur umweltgerechten Gestaltung energiebetriebener Produkte (EUROPÄISCHE UNION 2009), entwickeln sich die Analyse und Optimierung des Energiebedarfs speziell für Werkzeugmaschinen zu einem zentralen Thema (NEUGEBAUER ET AL. 2008). Daher wurden im Bereich der trennenden Fertigungsverfahren vermehrt wissenschaftliche Ansätze entwickelt. Aufgrund der Vielzahl der vorhandenen Studien werden diese in Tabelle 5 zusammengefasst. Es werden die Ziele der jeweiligen Studie (Analyse, Vergleich und Optimierung), das betrachtete System (Prozess oder Prozesskette), das analysierte Betriebsmittel und das Vorhandensein bzw. der Umfang der vorgenommenen Wirkungsabschätzung dargestellt. Zusätzlich werden, jeweils für die Werkstoffe, die Hilfs- und Betriebsstoffe und die Energie, der Umfang der betrachteten Lebenszyklusphasen der Ressource und der Detaillierungsgrad der Untersuchung unterschieden. Die Berücksichtigung der Ressource kann von der Vernachlässigung bis zur Integration des kompletten Lebenszyklus reichen. Häufig wird nur die Nutzungsphase der Ressource im Fertigungsprozess betrachtet, was einer teilweisen Berücksichtigung entspricht.

**Fügen.** Im Bereich der fügenden Fertigungsverfahren liegen bisher einzelne Studien zu verschiedenen Schweißverfahren vor. Eine vollständige Ökobilanzierung speziell für die Reparatur von Schiffswänden mittels konventioneller Schweißverfahren wurde von DRAKOPOULOS ET AL. (2006) durchgeführt. MATTES ET AL. (2010) widmen sich in ihrer Arbeit insbesondere dem Einfluss von Prozessparametern auf die Energieeffizienz des Laserstrahlschweißens. DAHMEN ET AL. (2010) untersuchen die relevanten Eigenschaften unterschiedlicher



Schweißverfahren (Laserstrahl-, Plasma-, MAG- und WIG-Schweißen) mit dem Ziel, das ökologischste Verfahren zu identifizieren. YEO & NEO (1998) konzentrieren sich hauptsächlich auf die Analyse der Emissionen von MIG- und Lichtbogenhandschweißverfahren.

Tabelle 5: Sach- und Ökobilanzierungsstudien zu trennenden Fertigungsverfahren

Ziel	Studie				WS		HBS		EN		Quelle(n)
	System	Betriebsmittel	Umweltwirkung		Lebenszyklus	Detaillierung	Lebenszyklus	Detaillierung	Lebenszyklus	Detaillierung	
O	PZ	WZM	○	○	○	○	○	○	●	●	ABELE & EISELE (2010), EISELE ET AL. (2011), ABELE ET AL. (2012)
V, O	PZ	WZM	○	○	○	○	○	○	●	●	BOOS & KUHLMANN (2010)
V, O	PZ	WZM	○	●	●	●	●	●	●	●	BRANHAM ET AL. (2008)
O	PZ	WZM	○	○	○	○	●	●	●	●	BRECHER ET AL. (2010)
A	PZ	WZM	●	●	●	●	●	●	●	●	DAHMUS & GUTOWSKI (2004)
O	PZ	WZM, LA	●	○	○	○	○	○	●	●	DEVOLDERE ET AL. (2007, 2008)
O	PZ	WZM	●	○	○	●	●	●	●	●	DIAZ ET AL. (2010a)
V, A	PZ	WZM	○	○	○	○	○	○	●	●	DIAZ ET AL. (2010b)
A	PZ	WZM	●	○	○	●	●	●	●	●	DIAZ ET AL. (2011)
A	PZ	WZM	○	○	○	○	○	○	●	●	DIETMAIR ET AL. (2008)
A	PZ	WZM	○	○	○	○	○	○	●	●	DRAGANESCU ET AL. (2003)
V	PZ	SA	●	○	○	●	●	●	●	●	DRAKOPOULOS ET AL. (2006)
O, A	PZ	LA	○	○	○	○	●	●	●	●	DUFLOU & KELLENS (2010), DUFLOU ET AL. (2011)
O, A	PZ	WZM	●	○	○	●	●	●	●	●	ECKEBRECHT (2000)
O	PZ	WZM	○	○	○	○	○	○	●	●	EISELE ET AL. (2011)
A	PK	WZM	●	●	●	○	○	○	●	●	GÖSCHEL ET AL. (2011)
O	PZ	WZM	○	○	○	○	○	○	●	●	GÖTZE ET AL. (2010)
A	PZ	WZM	○	○	○	○	○	○	●	●	KARA & LI (2011)
O	PZ	WZM, LA	●	○	○	●	●	●	●	●	KELLENS ET AL. (2012c, b)
V	PZ	WZM	●	○	○	●	●	●	●	●	KLOCKE ET AL. (2008)
O	PZ	WZM	○	○	○	○	○	○	●	●	KLOCKE ET AL. (2010)
V, O	PZ	WZM	○	○	○	○	○	○	●	●	KUHRKE ET AL. (2010), KUHRKE (2011)

Studie				WS	HBS	EN	Quelle(n)
O, A	PZ	WZM	○	● ●	● ●	● ●	LAREK (2012)
A	PZ	WZM	○	○ ○	○ ○	● ●	LI ET AL. (2011)
A	PZ	WZM	●	○ ○	● ●	● ●	MUNOZ & SHENG (1995)
V	PZ	WZM	○	○ ○	○ ○	● ●	NEWMAN ET AL. (2010)
V	PZ	WZM	●	○ ○	● ●	● ●	PUSAVEC ET AL. (2010)
O	PR	WZM	○	○ ○	● ●	● ●	RAJEMI ET AL. (2010)
V	PZ	WZM	○	● ●	● ●	● ●	SCHIEFER (2001)
V, O	PK	WZM, SA	○	○ ○	● ○	● ●	SCHLOSSER ET AL. (2011)
O	PZ	WZM	○	○ ○	○ ○	● ●	SCHMITT ET AL. (2011)
V	PK	WZM	●	● ●	● ●	● ●	SHENG ET AL. (1995)
A	Analyse			WZM		Werkzeugmaschine	
V	Vergleich			LA		Lasieranlage	
O	Optimierung			SA		sonstige Anlage	
PZ	Prozess			PK		Prozesskette	
○	Kriterium nicht erfüllt			WS		Werkstoffe	
●	Kriterium teilweise erfüllt			HBS		Hilfs- und Betriebsstoffe	
●	Kriterium voll erfüllt			EN		Energie	

**Beschichten.** Bei den beschichtenden Verfahren liegen Arbeiten über die plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung in der Waferproduktion, die anodische Oxidation von Aluminium, das Lackieren von Kraftfahrzeugen und das Laserauftragschweißen vor. GUTOWSKI ET AL. (2007) nehmen eine exergieorientierte<sup>10</sup> Betrachtung des Prozesses vor (vgl. Abschnitt 2.3.3.1) und vergleichen dessen Energiebedarf in Abhängigkeit von der Bearbeitungsrate mit dem anderer Fertigungsprozesse. HARSCOET & FROELICH (2008) legen den Schwerpunkt der Betrachtung auf die Umweltwirkungen des Lebenszyklus der für den Oxidationsprozess benötigten Chemikalien, die verursachten Emissionen und den Energiebedarf des Prozesses. Die Arbeit von ROELANT ET AL. (2004) untersucht den Energiebedarf und die gasförmigen Emissionen einer Lackierstraße mit dem Ziel, Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. MORROW ET AL. (2007) analysieren den Bedarf an Energie, Prozessgas und Metallpulver inklusive der nötigen Nachbearbeitung beim Laserauftragschweißen.

<sup>10</sup> Die VDI 4661 (2003) definiert die Exergie wie folgt: „Exergie ist Energie, die sich bei den jeweiligen thermodynamischen Umgebungsbedingungen prinzipiell in jede andere Energieform, insbesondere in Arbeit, umwandeln lässt. Sie wird daher auch als Arbeitsfähigkeit der Energie bezeichnet. Der Exergieanteil ist ein Qualitätsmerkmal für eine Energieform. So bestehen elektrische und mechanische Energie zu 100 % aus Exergie und sind somit hochwertig. Demgegenüber kann thermische Energie unterschiedlich hohe Exergieanteile aufweisen.“

**Stoffeigenschaften ändern.** MÜLLER & LÖFFLER (2009) analysieren den Energiebedarf des Laserhärtens und leiten Optimierungsmaßnahmen für die eingesetzten Betriebsmittel ab.

### 2.3.3 Verfahrenübergreifende Modellierung und Bewertung

#### 2.3.3.1 Sachbilanzorientierte Ansätze

Als sachbilanzorientierte Ansätze werden im Folgenden Arbeiten aufgeführt, die ein allgemeines Modellierungsvorgehen für Ressourcenströme beschreiben. Einige der Arbeiten stellen auch Bewertungskennzahlen für Fertigungsprozesse auf Basis der ermittelten Ressourcenströme vor.

DIETMAIR ET AL. schlagen eine Modellierung für die Energieströme von Produktionsmaschinen in Abhängigkeit von deren Betriebszuständen vor. Die betrachtete Maschine wird hierzu in Form eines Zustandsgraphen abgebildet und die Zustandsübergänge definiert. Mithilfe der Information über die elektrische Leistungsaufnahme in jedem Zustand können, basierend auf Programmabläufen, Prognosen über den resultierenden Energiebedarf getroffen werden. In einfachen Modellen werden konstante Leistungsniveaus angenommen, eine feinere Modellierung erfolgt parameterabhängig. Die so modellierten zustandsbasierten Energieverbrauchsprofile weisen eine Abweichung von ca. 5 % zu dem gemessenen Energiebedarf auf. Zusätzlich wird der Nutzungswirkungsgrad definiert, der den Anteil des Energieverbrauchs während der Hauptzeiten auf den Gesamtenergieverbrauch bezieht. Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich aus dem Produkt von Verfahrenswirkungsgrad, Maschinenwirkungsgrad und Nutzungswirkungsgrad (DIETMAIR ET AL. 2008, DIETMAIR & VERL 2010). Der Verfahrenswirkungsgrad und der Maschinenwirkungsgrad werden allerdings nicht weiter spezifiziert. Zudem benötigt eine konkrete Modellierung von nicht-spanenden Fertigungsprozessen Zusatzaufwand.

GUTOWSKI ET AL. haben eine Methode zur thermodynamischen Analyse der Ressourcenströme eines Fertigungsprozesses entwickelt. Hierzu wird das Betriebsmittel, auf dem das Fertigungsverfahren durchgeführt wird, als System verstanden, das aus mehreren Subsystemen besteht. Sowohl für jedes Subsystem als auch für das Gesamtsystem können ein- und ausgehende Arbeit, Wärme und Materialien als Exergieströme quantifiziert werden. Diese werden anschließend in Form von Exergiebilanzen aggregiert, wobei Verluste durch die vernichtete Exergie angegeben werden. Darauf aufbauend wird für die Bewertung von Fertigungsprozessen der „Grad der Perfektion“ als der Quotient aus der Exergie der nützlichen Produkte zu der Exergie aller eingehenden Ressourcen definiert (GUTOWSKI ET AL. 2006, 2009, GUTOWSKI 2010, GUTOWSKI ET AL. 2007, BRANHAM ET AL. 2008). Obwohl dieser Ansatz die Berücksichtigung aller Ressourcen

zulässt, werden Fertigungsprozesse häufig nur in Bezug auf deren Energiebedarf untersucht. RENALDI ET AL. (2011) haben den Ansatz auf seine Anwendbarkeit hin analysiert und festgestellt, dass die Exergie der nützlichen Produkte je nach Fertigungsverfahren unterschiedlich definiert werden muss und dass für das Umformen und das Ändern der Stoffeigenschaften noch keine sinnvollen Definitionen bestehen. Zudem werden einige Effekte bezüglich der Ressourceneffizienz, wie beispielsweise eine erhöhte Recyclingfähigkeit von Material, nur unzureichend durch die Bewertungskennzahl wiedergegeben (RENALDI ET AL. 2011).

DUFLOU ET AL. stellen im Rahmen der CO<sub>2</sub>PE!-Initiative eine Methode für die systematische Sachbilanzierung der Nutzungsphase von Fertigungsprozessen für die Verwendung in Sachbilanzdatenbanken zur Verfügung. Hierfür wurden zwei Vorgehensweisen entwickelt: ein Screening-Vorgehen und ein detailliertes Vorgehen. Das Screening-Vorgehen nutzt repräsentative, öffentlich verfügbare Daten und Berechnungen zur Bestimmung des Energiebedarfs und Materialverbrauchs. Das detaillierte Vorgehen besteht aus vier Modulen, die eine Zeitstudie, eine elektrische Leistungs- bzw. Energiestudie, eine Studie zum Verbrauch von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie eine Emissionsstudie umfassen (DUFLOU & KELLENS 2010, DUFLOU ET AL. 2011, KELLENS ET AL. 2012a, b, c). Der Werkstoff des erstellten Produkts wird nicht berücksichtigt und die erzeugten Energiebedarfswerte werden entsprechend der Ergebnisse der Zeitstudie als allgemeingültiger Anwendungsfall festgelegt.

Das Ziel des Projekts zur Bewertung der Energieeffizienz alternativer Prozesse und Technologieketten (BEAT) ist die Entwicklung einer Methode, die es ermöglicht, auf Prozessebene die Fertigungsketten in Abhängigkeit von verfügbaren Daten wie z. B. Schnittparametern vergleichen und unter energetischen Gesichtspunkten deren Einzelprozesse auslegen zu können. Insbesondere sollen auch die nichtlinearen physikalischen Zusammenhänge dargestellt werden können. Darauf basierend wird ein Softwaretool erstellt, das Unternehmen bei der Auswahl der effizientesten Technologiekette für den Zerspanungsprozess unterstützt (WEGNER ET AL. 2010, SCHLOSSER ET AL. 2011). Die Anpassung des Ansatzes auf andere Verfahren erfordert Zusatzaufwand.

Das Spitzencluster zu Energieeffizienten Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik (eniPROD) entwickelt Ansätze zur Energiebilanzierung von Prozessketten in der Automobilproduktion mit dem Ziel der anschließenden Optimierung von Produkten und Prozessen (NEUGEBAUER 2010). Der Ansatz von GÖSCHEL ET AL. befasst sich in diesem Zusammenhang mit der Ökobilanzierung von Fertigungsprozessketten. In einem fünfstufigen Vorgehen werden Ressourcenströme von Prozessketten für die Blechumformung analysiert und bewertet. Die Bewertung erfolgt anhand von Energie- und Ressourceneffizienzkennzahlen, bei denen beispielsweise die Prozesseffizienz über die Energie

für die eigentliche Prozessdurchführung in Relation zum Gesamtenergiebedarf definiert wird (GÖSCHEL ET AL. 2010, 2011).

WEINERT führt das Konzept der sogenannten „EnergyBlocks“ ein, mit deren Hilfe der Energiebedarf von Fertigungsprozessen quantifiziert werden kann. Ein EnergyBlock entspricht einem Betriebszustandsabschnitt, der über die Dauer des Zustands und die währenddessen aufgenommene Energie beschreibbar gemacht wird. Innerhalb eines Blocks wird zu jedem Zeitpunkt die Leistung mithilfe einer mathematischen Funktion beschrieben. So können unterschiedliche Produktionsabläufe variabel über EnergyBlocks zusammengestellt werden und der Gesamtenergiebedarf bestimmt werden. Die Funktionen werden von Leistungsmessungen abgeleitet und unterschiedlichen Betriebsmitteln einer Leistungsklasse unter der Annahme zugeordnet, dass sie ähnliche Energiebedarfe aufweisen (WEINERT 2010a, b, WEINERT ET AL. 2011). Die abschnittsweise mathematische Modellierung der Leistungskurven in EnergyBlocks ist mit einem gewissen Aufwand verbunden, der weniger für eine einmalige Planung als für eine dauerhafte Nutzung der Blocks im Rahmen von Produktionsplanungs- und Steuerungssystemen gerechtfertigt ist.

RAHIMIFARD ET AL. stellen ein Modell für die beinhaltetete Energie eines Produkts vor, die sich aus dessen Wertschöpfungsschritten ergibt. In der Produktion setzt sich die beinhaltetete Energie eines Produkts aus der direkten Energie, die von Fertigungsprozessen verbraucht wird, und der indirekten Energie, die für die Produktionsumgebung benötigt wird (z. B. Beleuchtung, Heizung, Klimatisierung), zusammen. Die direkte Energie wird zudem in die theoretische Energie und die Hilfsenergie unterteilt. Die theoretische Energie wird definiert als die minimal benötigte Energie, um einen Prozess durchzuführen und kann häufig unter Zuhilfenahme physikalischer Formeln berechnet werden. Die Hilfsenergie bezeichnet den Energiebedarf für Unterstützungsfunktionen zur eigentlichen Durchführung eines Prozesses (z. B. für eine Kühlschmierstoffpumpe) und wird i. d. R. durch empirische Untersuchungen quantifiziert. Durch die Definition unterschiedlicher Kennzahlen lässt sich die Effizienz von Prozessen, Produkten und Produktionssystemen analysieren (RAHIMIFARD ET AL. 2010). Die eigentliche Modellierung der Energieströme als Basis für die Berechnungen wird untergeordnet behandelt.

CHOI ET AL. unterscheiden in ihrem sachbilanzorientierten Ansatz zwischen Fertigungsprozessen, bei denen die Masse reduziert wird und Fertigungsprozessen, bei denen die Masse erhalten bleibt sowie fügenden Fertigungsprozessen. Der Modellierungsansatz berücksichtigt sowohl die Wiederverwendung von z. B. Werkzeugen oder Kühlschmiermitteln als auch die Verknüpfung von Prozessen in Prozessketten durch die Weitergabe von Zwischenprodukten. Die konkrete Quantifizierung von Ressourcenströmen wird beispielhaft anhand eines spanenden Prozesses dargestellt (CHOI ET AL. 1997). Die Modellierung der

allgemeinen Ressourcenströme wird jedoch nicht detailliert. Der Ansatz stellt keine Bewertungskennzahl zur Verfügung, sondern beurteilt unterschiedliche Fertigungsmöglichkeiten verbal argumentativ.

SCHIEFER zeigt in seiner Arbeit ein allgemeines Vorgehen für Fertigungsverfahren und ein detailliertes Vorgehen für die Sachbilanzierung spanender Fertigungsprozesse mit definierter Schneide auf. Es wurden in diesem Zusammenhang drei Teilbilanzräume definiert: die physikalische Wirkstelle, das Mittel (z. B. die Maschine oder Anlage) und die Prozessperipherie. Die Unterscheidung der Bilanzräume eignet sich besonders für die Modellierung des Energiebedarfs, der aus der Summe von Wirkenergie, Energie der Anlage und Energie der Peripherie berechnet wird. Außerdem werden konkrete Vorschläge zur Quantifizierung von Hilfs- und Betriebsstoffströmen sowie Abfall- und Emissionsströmen von spanenden Prozessen gegeben (SCHIEFER 2001). Eine entsprechende Detaillierung des allgemeinen Vorgehens für nicht-spanende Fertigungsverfahren würde zusätzlichen Aufwand nach sich ziehen.

### 2.3.3.2 Ökobilanzorientierte Ansätze

Die folgenden Arbeiten stellen Ansätze zur Ökobilanzierung von Fertigungsprozessen bzw. -prozessketten vor. Sie beschreiben i. d. R. sowohl ein Vorgehen zur Sachbilanzierung als auch eine Methode für die Wirkungsabschätzung der quantifizierten Ressourcenströme.

EYERER bietet eine grundsätzliche Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung von Verfahren, Produkten und Systemen an, in der eine mathematische Abbildung der auftretenden Stoff- und Energieströme angestrebt wird (EYERER 1996). Diese Methodik wurde in Form des Software-Tools „GaBi“ der PE INTERNATIONAL AG umgesetzt, das den Schwerpunkt auf die Bilanzierung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts setzt. Eine Gruppe von Fertigungsprozessen wird i. d. R. durch einen Standardprozess und dessen Energie- und Materialströme repräsentiert, die anschließend mithilfe eines der Wirkungsabschätzungsverfahren aus Tabelle 4 bewertet werden.

ABELE & SCHREMS stellen eine Methode für den Vergleich von alternativen Fertigungsprozessketten in der Planungsphase zur Verfügung. Dazu wurden für die spanende Bearbeitung, das Umformen, das Lackieren, das Kunststoffspritzgießen und das Schutzgasschweißen Prozessmodelle entwickelt. Es folgt eine multikriterielle Bewertung anhand der individuellen Gewichtung von benötigten Ressourcen und ggf. technischen sowie ökonomischen Parametern und die Aggregation zu einer Kennzahl (ABELE & SCHREMS 2010, SCHREMS ET AL. 2011). Die Spezifizierung bzw. Herleitung der Bewertungskriterien wird jedoch durch das Verfahren nicht unterstützt. Zudem wird eine allgemeine Beschrei-

bung für die Erstellung der Prozessmodelle nur für die Quantifizierung des Energiebedarfs von spanenden Werkzeugmaschinen dargestellt.

STIENS definiert in seiner Arbeit einen gesamtheitlichen Wirkungsgrad für Fertigungsprozesse und -prozessketten, der auf der Methode des kumulierten Energieaufwands nach VDI 4600 (1997) (vgl. Abschnitt 2.2.4.1) basiert. Dieser Wirkungsgrad ist definiert als der Quotient aus dem sogenannten „ideellen Energieeinsatz“ und dem gesamten zurechenbaren Energieeinsatz. Als ideale Energie wird die Energie bezeichnet, die in einem völlig verlustfreien System zum Betrieb eines Prozesses benötigt wird. Für die Bestimmung der gesamten zurechenbaren Energie ist eine klare Systemabgrenzung wichtig, um eine Vergleichbarkeit zu anderen Prozessen zu gewährleisten. Die die Bilanzgrenzen überschreitenden Ressourcenströme werden in vier wesentliche Gruppen eingeteilt: den direkten Energieeinsatz, den Materialfluss in einem Prozess, die Hilfsstoffe und die Abnutzung der Maschinen und Werkzeuge sowie den Abfall und das Recycling (STIENS 2000). Neben dem kumulierten Energieaufwand werden keine weiteren Umweltwirkungen berücksichtigt.

SHENG ET AL. legen in ihrem Ansatz besonderen Wert auf die Berücksichtigung der entstehenden festen, flüssigen und gasförmigen Emissionen während der Fertigungsplanung. Bei der Modellierung der Fertigungsprozesskette unterscheiden sie die Prozesse, die bei der Herstellung eines bestimmten Produkts auf einem Betriebsmittel durchgeführt werden. Außerdem beachten sie bei der Modellierung der Emissionsströme, dass diese nicht nur direkt von der produzierten Stückzahl abhängen, sondern auch fixe Emissionen bei einem Betriebsmittel anfallen. Schließlich wird eine multikriterielle Schadensbewertung der Emissionsauswirkungen auf die menschliche Gesundheit durchgeführt (SHENG ET AL. 1995, 1998).

ATIK stellt eine Methode zur Entscheidungsunterstützung für die Entwicklung umweltgerechter Produkte vor. Diese beinhaltet auch die Ressourcenströme, die für die Herstellung der Produkte anfallen. Hierbei wird insbesondere auf die Berücksichtigung der inhärenten Unsicherheit von Daten eingegangen, welche mittels Fuzzy-Set-Theorie<sup>11</sup> abgebildet wird. Für die Wirkungsabschätzung wird eine Meta-Methode entwickelt, die sich aus dem kumulierten Energieaufwand, dem MIPS und dem Eco-indicator 95<sup>12</sup> zusammensetzt (ATIK 2001). Die eigentliche Sachbilanzierung bzw. Modellierung der Ressourcenströme wird in der Arbeit nicht behandelt.

---

<sup>11</sup> Die Fuzzy-Set-Theorie ermöglicht es, Variablen, die nicht durch exakte Zahlenwerte, sondern durch linguistische Terme wie beispielsweise „heiß“ oder „lauwarm“ angegeben werden können, mit ihrer inhärenten (linguistischen) Unsicherheit abzubilden und in mathematische Modelle zu überführen.

<sup>12</sup> Der Eco-indicator 95 ist der methodische Vorgänger des Eco-indicator 99. Die aufgeführten Bewertungsmethoden wurden in Abschnitt 2.2.4.1 und Abschnitt 2.2.4.5 vorgestellt.

FIJAL stellt in seiner Arbeit eine Methode zur ökologischen Bewertung von Produktionstechnologien dar und legt fest, dass als Ressourcen Rohstoffe, Energiebedarf, Emissionen, Produkte und Verpackungen berücksichtigt werden sollen. Ein Vorgehen für die Modellierung oder Quantifizierung der Ressourcenströme wird nicht beschrieben. Für die Bewertung erhält jede Ressourcenklasse einen Bewertungsindex, bei dem die Masse einer bestimmten Ressource ins Verhältnis zur Masse aller gefertigten Produkte gesetzt wird. Bei der Energie erfolgt zunächst eine Umwandlung in Steinkohleeinheiten, um mit der Masse eine gemeinsame Einheit herbeizuführen. Im Falle der Ressourcenklassen Emissionen, Produkt und Verpackung wird die Umweltwirkung der Ressourcen in den jeweiligen Index integriert. Schließlich werden alle Indizes in einer Bewertungskenngröße für Produktionstechnologien zusammengefasst (FIJAL 2007). Die Umweltwirkungen der Rohstoffe und des Energiebedarfs bleiben bei diesem Ansatz unberücksichtigt.

### 2.4 Zusammenfassende Analyse und Handlungsbedarf

**Methodische Grundlagen der Ökobilanzierung.** Die allgemeine Methode der Ökobilanzierung konzentriert sich grundsätzlich auf die Erstellung einer Sachbilanz für Produkte und Dienstleistungen. Sachbilanzen für Prozesse werden im Rahmen der klassischen Ökobilanzierung untergeordnet behandelt. Gemäß der Aussage von REBITZER ET AL. (2004) zeigt sich, dass für prozessorientierte Sachbilanzen Methoden für eine einfache Modellierung fehlen, die z. B. Vorgaben für sinnvolle Systemgrenzen in einem bestimmten Anwendungsgebiet bereitstellen. Sind solche Methoden nicht vorhanden, kann das Durchführen einer Ökobilanz bereits aufgrund des hohen Aufwands scheitern, der allein für die Konzeption der Studie erforderlich ist.

Der Einsatz bestehender Methoden zur Wirkungsabschätzung ist nur nach eingehender Beschäftigung mit den dort eingesetzten Wirkungsindikatoren und der durch die Methode unterstellten Werthaltung möglich. Diese erlauben es jedoch nicht bzw. nur in geringem Maße<sup>13</sup>, die Schwerpunkte und Werthaltung des bewertenden Unternehmens zu integrieren und damit eine bewusste sowie begründbare Entscheidung zu gewährleisten. Auch seitens der Standardisierungsinstitutionen existieren aktuell keine konkreten Vorgaben.

Als Lösung für die angesprochenen Schwächen der Ökobilanzierung schlagen HAES ET AL. (2002, S. 8) vor, anwendungsorientierte generische Methoden zu

---

<sup>13</sup> Die Methode des Eco-indicator 99 unterscheidet Gewichtungen anhand von drei Archetypen von Entscheidern: dem Individualisten, dem Verfechter des Egalitarismus und dem hierarchisch orientierten Entscheider (GOEDKOOP & SPRIENSMAS 2001, S. 17 f.).



entwickeln. Diese sollen einerseits einen einheitlichen Ansatz bereitstellen und andererseits ein fallspezifisches Vorgehen ermöglichen.

**Ökobilanzierung in der Fertigung.** Die bestehenden Ansätze zur Ökobilanzierung in der Fertigung weisen aus folgenden drei Gründen Defizite auf: Erstens sind die Arbeiten häufig sehr spezifisch und lassen sich nicht auf andere Anwendungsfälle übertragen. Zweitens werden im Bereich der Sachbilanzierung unterschiedliche Vereinfachungen vorgenommen. Ein einheitliches Vorgehen ist dabei nicht zu erkennen. Drittens wird die Wirkungsabschätzung bei der aktuellen Ökobilanzierung von Fertigungsprozessen nachlässig behandelt.

Einzelne Aspekte aber auch die Gesamtmethode der Ökobilanzierung sind in der Fertigung bereits vielfach zur Anwendung gekommen. Gerade die verfahrensspezifischen Studien wurden allerdings häufig für einen konkreten Anwendungsfall durchgeführt und sind damit nicht allgemeingültig einsetzbar. Daher müssen für eine Studie, welche sich beispielsweise auf ein anderes Fertigungsverfahren oder Betriebsmittel bezieht, die Ziele und der Untersuchungsrahmen sowie die Modellierung der Ressourcenströme von Grund auf neu definiert werden. Auch bei den verfahrensübergreifenden Ansätzen findet sich kein ausgereiftes Vorgehen, das direkt zur Sachbilanzierung diverser Fertigungsprozesse angewendet werden kann.

Bei der Sachbilanzierung in der Fertigung werden häufig verschiedenste Arten des Streamlinings durchgeführt, z. T. auch ohne die Auswirkungen der Vereinfachungen zu analysieren. Beispielsweise werden nur einzelne Ressourcen, gewisse Phasen des Lebenszyklus oder generische Standarddatensätze berücksichtigt. Bei einem Großteil der verfahrensübergreifenden Ansätze und spezifischen Studien liegt der Fokus der Sachbilanzierung auf der Ressource Energie (z. B. DIETMAIR ET AL. (2008), SCHLOSSER ET AL. (2011) oder RAHIMIFARD ET AL. (2010)). Zusätzlich wird in fast allen Fällen nur die Nutzungsphase der Ressourcen, d. h. deren Einsatz bzw. Verbrauch in der Fertigung, betrachtet und bewertet. Die Auswirkungen von Gewinnung, Veredlung und Produktion sowie End of Life einer Ressource finden damit keine Berücksichtigung. Die Annahme, dass die Ressourcenströme eines Standardprozesses als generischer Datensatz für eine ganze Familie von Betriebsmitteln oder Verfahren angesetzt werden kann, liegt mehreren Ansätzen zugrunde (z. B. WEINERT (2010a) oder EYERER (1996)). Diese Hypothese, bezogen auf die Ressource Energie, konnte allerdings im Rahmen von Messreihen an ähnlichen Werkzeugmaschinen nicht bestätigt werden (KARA & LI 2011). Insbesondere für eine vergleichende Bewertung eignet sich die Nutzung solcher Daten daher nicht.

Eine integrierte Wirkungsabschätzung findet nur bei den ökobilanzorientierten Ansätzen und ausgewählten prozessspezifischen Studien statt. Keine dieser

Arbeiten umfasst jedoch die methodische Herleitung von Kriterien für die Berücksichtigung aller Aspekte möglicher Umweltwirkungen. Einige der Arbeiten betrachten nur eine ausgewählte Umweltwirkung wie den kumulierten Energiebedarf oder die Auswirkung von Emissionen auf die menschliche Gesundheit.

**Fazit.** Zusammenfassend ist daher festzustellen, dass im Bereich der Ökobilanzierung kein allgemeines Vorgehen für die Bilanzierung und ressourcenorientierte Bewertung von Fertigungsprozessen und -prozessketten existiert, wie dies seitens der klassischen Ökobilanz-Literatur gefordert wird. Zum einen existiert kein allgemeines Modellierungsvorgehen für die Ressourcenströme, das als Richtlinie für die Sachbilanzierung in der Fertigung dienen kann. Zum anderen fehlt ein Ansatz zur Wirkungsabschätzung, der die Prioritäten produzierender Unternehmen in die Bewertung integriert und deren Entscheidungen im fertigungstechnischen Umfeld aus der Perspektive der Ressourceneffizienz unterstützt. Ein methodisches Vorgehen zur Bewertung der Ressourceneffizienz steht daher insbesondere für die Entscheidungsunterstützung während der Fertigungsplanung nicht zur Verfügung.

## 3 Ansatz zur Bewertung der Ressourceneffizienz

### 3.1 Allgemeines

Nachfolgend wird der in der vorliegenden Arbeit verfolgte Ansatz zur Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung skizziert. Hierzu werden zunächst die Anforderungen an eine solche Methode aufgeführt (vgl. Abschnitt 3.2). Anschließend erfolgt eine Analyse der im Zusammenhang mit einer Fertigungsprozesskette auftretenden Ressourcenströme (vgl. Abschnitt 3.3). Schließlich werden die Rahmenbedingungen und Hauptbestandteile der entwickelten Methode vorgestellt (vgl. Abschnitt 3.4).

### 3.2 Anforderungen

Wie in Abschnitt 1.3.1 dargestellt, ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer quantitativen Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz von Fertigungsprozessketten. Hierzu soll eine Kennzahl definiert werden, die die Ressourceneffizienz im Umfeld der Fertigung ausdrückt. Folglich ist ein Vorgehen erforderlich, das die Bestimmung solch einer Kennzahl unterstützt. Der für die Zielsetzung relevante Betrachtungsraum wurde in Abschnitt 1.3.2 weiter eingegrenzt, so dass der Fokus auf dem Verbrauch von Repetierfaktoren liegt, wobei zusätzlich die Auswirkungen deren Einsatzes auf die natürlichen Ressourcen berücksichtigt werden sollen. Der geeignete Anwendungszeitpunkt der Methode ist die Phase der operativen Technologieplanung, in der der Ressourcenverbrauch noch erheblich beeinflusst werden kann und die möglichen Betriebsmittelalternativen bereits bekannt sind. Das Ergebnis der Methode soll den Entscheider schließlich dazu befähigen, folgende Frage fundiert beantworten zu können:

Welche Fertigungsprozesskette (aus einer Menge möglicher Alternativen) ist aus Sicht der Ressourceneffizienz am vorteilhaftesten?

Vor dem Hintergrund der Zielsetzung und der getroffenen Eingrenzung des Betrachtungsraums sind folgende allgemeine Anforderungen an die Bewertungsmethode zu stellen:

- A1 *Quantitative Bewertung der Ressourceneffizienz:* Um eine eindeutige Antwort auf die oben angegebene Frage zu ermöglichen, ist ein quantitatives Bewertungsergebnis notwendig. Daher soll eine Kennzahl definiert werden,

die auf quantitativen Daten basiert. Falls für einige Faktoren ausschließlich qualitative Informationen zur Verfügung stehen, müssen diese zunächst mit geeigneten Methoden in quantitative Daten überführt werden, um anschließend in die Kennzahl eingehen zu können.

- A2 *Konformität mit dem Ökobilanzierungsvorgehen*: Da die DIN 14040 (2006) und die DIN 14044 (2006) die methodischen Grundlagen einer allgemeinen ökologischen Bewertung festlegen, sollen deren Vorgaben auch bei der Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung zur Anwendung kommen. Die Ressourceneffizienz-Bewertung stellt somit eine spezielle Ausprägung der ökologischen Bewertung dar, die Bewertungsfälle im Fertigungsumfeld fokussiert.
- A3 *Vergleichbarkeit von Fertigungsprozessketten*: Um verschiedene Bewertungsergebnisse vergleichen zu können, bedarf es einer transparenten Vorgehensweise, die insbesondere die gewählten Systemgrenzen offenlegt. Außerdem kommt der Definition der Bezugsgröße eine besondere Bedeutung zu, da Fertigungsprozessketten immer in Bezug auf eine bestimmte Fertigungsaufgabe bewertet werden müssen. Alle Bewertungsalternativen müssen daher eine gemeinsame Bezugsgröße aufweisen.
- A4 *Generische Anwendbarkeit für alle Technologien*: Die Methode und insbesondere die Modellierung des zu bewertenden Systems sowie der damit verbundenen Ressourcenströme ist so allgemeingültig zu gestalten, dass diese im Hinblick auf alle Technologien der DIN 8580 (2003) und genutzten Betriebsmittel valide ist. Das resultierende Vorgehen stellt somit eine anwendungsorientierte generische Methode dar, wie sie von HAES ET AL. (2002) gefordert wird.
- A5 *Beachtung der Ausprägungen von Ressourcen*: Die in der Fertigung in Form von Repetierfaktoren zum Einsatz kommenden Ressourcen weisen unterschiedliche Eigenschaften auf. Zum einen können sie in materielle und energetische Ressourcen, wie beispielsweise Stahl bzw. elektrische Energie, unterschieden werden. Zum anderen weisen materielle Ressourcen weitere relevante Eigenschaften (z. B. unterschiedliche Aggregatzustände) auf, die bei der Bewertung der Ressourceneffizienz berücksichtigt werden müssen.
- A6 *Systematische Berücksichtigung der Umweltwirkungen sowie der Vor- und Nachprozesse*: Wie in Abschnitt 1.2.2.2 dargestellt, gehen der Nutzung von Fertigungsressourcen Vorprozesse voraus, die der Ressourcengewinnung und -veredelung dienen. Ähnlich bedarf es Nachprozesse, um Ressourcen im Anschluss an ihren Einsatz als Abfall nachzubehandeln und aufzubereiten. Die Auswirkungen dieser vor- und nachgelagerten Prozesse sowie die Umweltwirkungen der Ressourcenströme der betrachteten Prozesskette

müssen bei der Bewertung berücksichtigt werden. Dies ist notwendig, um das Bewertungsergebnis nicht durch einen rein lokalen Betrachtungsfokus zu verzerren und eine global vorteilhafte Entscheidung herbeizuführen.

- A7 *Integration der Unternehmenspräferenzen:* Die Bewertung soll eine Entscheidung im Sinne der Ziele und Werte des betreffenden Unternehmens unterstützen. Daher muss für den Anwender die Möglichkeit bestehen, seine Präferenzen und Schwerpunkte explizit in das Bewertungsschema zu integrieren. Gleichzeitig soll durch das Vorgehen sichergestellt werden, dass der Einfluss subjektiver Präferenzen stets nachvollziehbar bleibt.
- A8 *Anwenderfreundlichkeit:* Die Durchführung der Methode soll sich in bestehende Abläufe einbinden lassen und eine effiziente Bewertung der betrachteten Systeme ermöglichen. Soweit möglich soll auf bestehende Konventionen und bekannte Daten zurückgegriffen werden. Außerdem soll es möglich sein, bereits durchgeführte Bewertungen wieder bzw. weiter zu verwenden, um den Aufwand für die Anwendung der Methode gering zu halten.

### 3.3 Ressourcenströme einer Fertigungsprozesskette

#### 3.3.1 Betrachtung der direkten Ressourcenströme

Entsprechend der Definition in Abschnitt 1.2.3 besteht eine Prozesskette aus mehreren Einzelprozessen (vgl. Abbildung 13). Sie umfasst zum einen Fertigungsprozesse, die auch als *primäre Prozesse* bezeichnet werden. Handelt es sich um einen solchen Fertigungsprozess, wendet dieser eine Technologie auf einem Betriebsmittel an, um eine Fertigungsaufgabe zu erfüllen. Primäre Prozesse sind damit wertschöpfend und bewirken eine Änderung des Produktzustands.

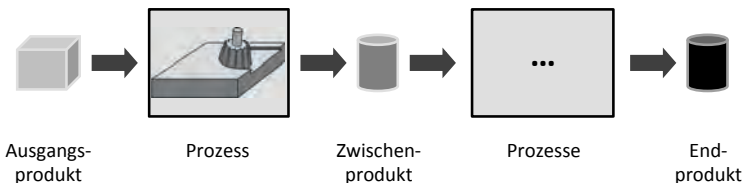


Abbildung 13: Veinfachte Darstellung einer Fertigungsprozesskette

Zum anderen können zusätzlich *sekundäre Prozesse* wie beispielsweise Transport- oder Handhabungsprozesse Teile der Kette sein. Sekundäre Prozesse hingegen führen zu keiner Wertschöpfung am Produkt. Bei einer Prozesskette

ergeben sich grundsätzlich die in Abbildung 14 dargestellten Ressourcenströme. Da diese Ressourcenströme unmittelbar von der Prozesskette verursacht werden, werden sie *direkte Ressourcenströme* genannt.

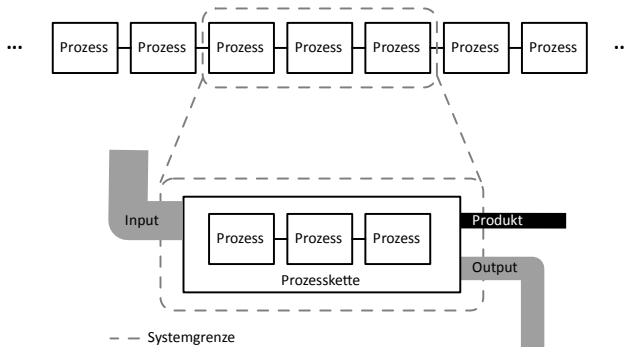


Abbildung 14: Direkte Ressourcenströme einer Fertigungsprozesskette

Die Begriffe Ressourcenstrom und Ressourcenfluss beruhen in der nachfolgenden Betrachtung auf der Unterscheidung von Bewegungsgrößen und Flussgrößen. Bewegungsgrößen sind absolute Veränderungen von Quantitäten (oder auch Beständen), Flussgrößen hingegen relative Veränderungen pro Zeiteinheit (OSSIMITZ 2000, S. 82 f.). Nachfolgend wird eine Bewegungsgröße als *Ressourcenstrom* bezeichnet und ist die Quantität einer Ressource, die für die Erfüllung einer Fertigungsaufgabe verbraucht wird. Ein *Ressourcenfluss* hingegen ist eine Flussgröße und beschreibt die pro Zeiteinheit fließende Quantität einer Ressource. Formal werden die Menge der Ressourcenströme  $R$  sowie der Ressourcenflüsse  $R'$  wie folgt definiert<sup>14</sup>, wobei  $J$  die Indexmenge<sup>15</sup> der Ressourcenströme bzw. -flüsse darstellt:

$$R := \{r_j \mid r_j \text{ ist Ressourcenstrom der } j\text{-ten Ressource, } j \in J\}$$

$$R' := \{r'_j \mid r'_j \text{ ist Ressourcenfluss der } j\text{-ten Ressource, } j \in J\}$$

Ressourcenströme und -flüsse werden vektoriell beschrieben, wenn es sich um mehrere Ressourcen handelt, die sich auf dieselbe Fertigungsaufgabe bzw.

<sup>14</sup> Es gilt:  $R$  und  $R'$  sind isomorph. Ein Isomorphismus ist eine Abbildung zwischen zwei mathematischen Strukturen, durch die Teile einer Struktur auf bedeutungsgleiche Teile einer anderen Struktur umkehrbar eindeutig (bijektiv) abgebildet werden.

<sup>15</sup> Unter einer Indexmenge wird eine beliebige Menge verstanden, die die Elemente anderer Mengen indiziert. Im Fall der Indexmenge  $J$  entsprechen deren Elemente den betrachteten Ressourcen.

Bezugsgröße beziehen. Bei einer Prozesskette treten Input-, Output- sowie Produkt-Ressourcenströme auf. *Input-Ressourcenströme* sind die Ressourcen, die von der Fertigungsumgebung in die Prozesskette eingehen. Die Menge der Input-Ressourcenströme  $R_{\text{in}}$  wird wie folgt festgelegt:

$$R_{\text{in}} := \left\{ r_{\text{in } j} \mid r_{\text{in } j} \text{ ist Input-Ressourcenstrom} \right. \\ \left. \text{der } j\text{-ten Ressource, } j \in J \right\}$$

Als *Output-Ressourcenströme* werden die Ressourcen bezeichnet, die die Fertigungsprozesskette verlassen und nicht in das Produkt eingehen. Die formale Bezeichnung der Menge der Output-Ressourcenströme  $R_{\text{out}}$  ist:

$$R_{\text{out}} := \left\{ r_{\text{out } j} \mid r_{\text{out } j} \text{ ist Output-Ressourcenstrom} \right. \\ \left. \text{der } j\text{-ten Ressource, } j \in J \right\}$$

Die rein wertschöpfenden *Produkt-Ressourcenströme* der Prozesskette ergeben sich aus den Ressourcen, die allein in das Endprodukt eingehen. Formal wird im Rahmen dieser Arbeit die Menge der Produkt-Ressourcenströme  $R_{\text{pro}}$  definiert als:

$$R_{\text{pro}} := \left\{ r_{\text{pro } j} \mid r_{\text{pro } j} \text{ ist Produkt-Ressourcenstrom} \right. \\ \left. \text{der } j\text{-ten Ressource, } j \in J \right\}$$

Bei jedem bilanzierungsorientierten Ressourcenstrom ist zu unterscheiden, ob es sich um materielle oder energetische Ressourcen handelt. *Materielle Ressourcen* werden im Rahmen dieser Arbeit mit ihrer Masse in Gramm bzw. Kilogramm ([Masse] = g bzw. kg) angegeben. Die materiellen Ressourcen kommen in Form von festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen zur Anwendung und können grundsätzlich auch in anderen Einheiten als deren Masse angegeben werden. Diese anderen Einheiten der materiellen Ressourcen können jedoch über physikalische Beziehungen (z. B. Masse = Volumen · Dichte) immer in die Einheit der Masse überführt werden. Energetische Ressourcen in der Fertigung können in direkt und indirekt energetische Ressourcen unterteilt werden. *Direkt energetische Ressourcen* sind beispielsweise die thermische oder die elektrische Energie mit der Einheit Joule bzw. Kilojoule ([Energie] = J bzw. kJ), die als solche die Systemgrenze der Prozesskette überschreiten. *Indirekt energetische Ressourcen* sind solche Ressourcen, die als materielle Ressourcen, i. d. R. Brennstoffe wie z. B. Gas oder Öl zur Erzeugung thermischer Energie, in die Fertigungsprozesskette eingehen und deren Verbrennungsprodukte diese auch wieder verlassen. Diese Ressourcen zählen einerseits zu den materiellen Ressourcen und werden daher mit ihrer Masse angegeben. Andererseits stellen sie eingehende Energie dar und werden mit ihrem Heizwert  $H_u$  in der Einheit Joule ( $[H_u] = \text{J}$ ) ange-

geben. Die getroffene Unterscheidung wird durch die Teilung der Indexmenge der Ressourcenströme in  $J_M$  für materielle und  $J_E$  für energetische Ressourcen wiedergegeben. Dabei beschreibt die Schnittmenge der Indexmengen der materiellen und energetischen Ressourcenströme  $J_M \cap J_E$  die Indexmenge der indirekt energetischen Ressourcenströme. Die Indexmengen sind wie folgt definiert und die Zusammenhänge werden in Abbildung 15 dargestellt:

$$J = J_M \cup J_E$$

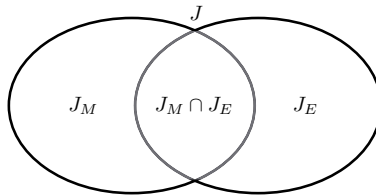


Abbildung 15: Indexmengen der materiellen, direkt energetischen und indirekt energetischen Ressourcenströme

Die obigen Ausführungen zu den Definitionen der Ressourcenströme lassen sich unmittelbar auf die Ressourcenflüsse übertragen.

#### 3.3.2 Erweiterte Betrachtung der Ressourcenströme

Wie in Abbildung 16 ersichtlich, haben die direkten Ressourcenströme der betrachteten Fertigungsprozesskette Auswirkungen auf die natürlichen Ressourcen der Ökosphäre und den Ressourcenverbrauch der Vor- und Nachprozesse. Einige Input-Ressourcen der Prozesskette werden der Ökosphäre entnommen, beispielsweise durch den Abbau von Erzen, aus denen in Vorprozessen Stahl hergestellt wird. Diese Ressourcen werden als primäre Input-Ressourcen bezeichnet. Weitere Input-Ressourcen sind recycelte Output-Ressourcen anderer Prozesse und stellen sekundäre Input-Ressourcen dar. Sie verbleiben damit in der Technosphäre. Output-Ressourcen werden entweder geradewegs als ungeklärte Output-Ressourcen in die Ökosphäre geleitet oder in Nachprozessen zunächst behandelt und dann als geklärte Output-Ressourcen in die Umwelt abgegeben. Weitere Output-Ressourcen können wiederaufbereitet werden, sodass diese zu sekundären Input-Ressourcen für andere Prozesse werden. Die Produkt-Ressourcenströme werden in die Technosphäre abgegeben. Sie treten erst am Ende ihres Lebenszyklus in die Ökosphäre ein oder verbleiben z. T. auch dann noch als wiederverwertetes Produkt in der Technosphäre.



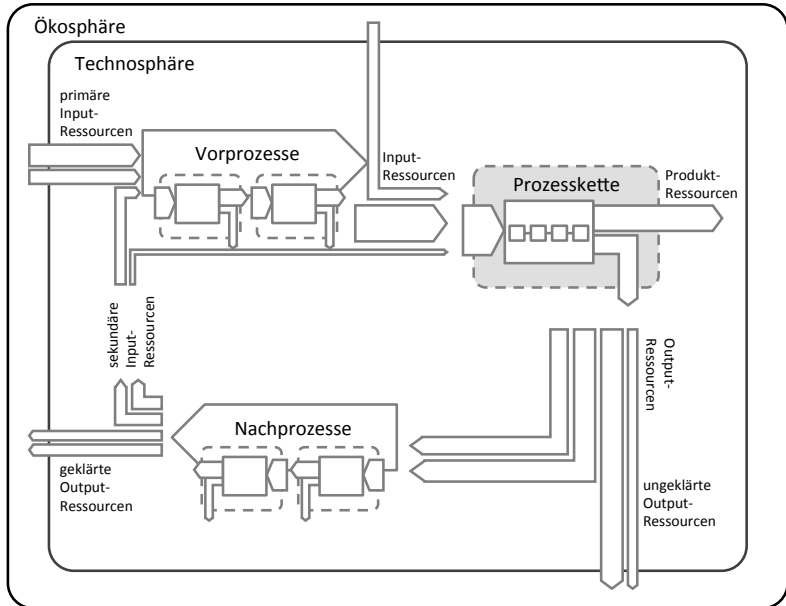


Abbildung 16: Erweiterte Betrachtung der Ressourcenströme

### 3.4 Konzeption der Bewertungsmethode

#### 3.4.1 Allgemeines

Die Konzeption der Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz orientiert sich entsprechend der oben aufgeführten Anforderung A2 am Ökobilanzierungsvorgehen der DIN 14040 (2006) sowie der DIN 14044 (2006), welches in Abschnitt 2.2 beschrieben wurde. Zunächst werden die methodischen Rahmenbedingungen der einzelnen Phasen der Ökobilanzierung (vgl. Abbildung 9 auf S. 18) hinsichtlich der Anwendung im Fertigungsumfeld näher betrachtet (vgl. Abschnitt 3.4.2). Hierbei ergeben sich bereits Hinweise auf methodische Grundsätze und Schwerpunkte bei einer Bewertung in der Fertigung im Vergleich zu einem allgemeinen Anwendungsfall. Darauf aufbauend erfolgt die Definition der Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung, deren Phasen in Anlehnung an die Ökobilanzierung abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 3.4.3). Die phasenspezifischen Aufgaben des entwickelten Vorgehens sind hierbei auf die Besonderheiten und Bedürfnisse bei der Bewertung im Fertigungsumfeld zugeschnitten und bilden die Grundlage für die Ableitung der Bewertungskennzahlen (vgl. Abschnitt 3.4.4).

#### 3.4.2 Ökobilanzierung im Rahmen der Fertigungsgestaltung

**Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens.** Das Ziel einer Studie im Rahmen der Fertigungsgestaltung ist im Allgemeinen der Vergleich alternativer Ausprägungen von Fertigungskonzepten (vgl. Anforderung A3), wobei der Bewertung von Fertigungsprozessketten eine besondere Bedeutung zukommt. Derartige Studien umfassen sowohl die Entscheidung zwischen unterschiedlichen Betriebsmitteln und Technologien als auch deren Kombination in Form von Fertigungsprozessen. Das Ziel im Sinne der in Tabelle 3 auf S. 19 aufgeführten Ordnungsstruktur ist damit eine Entscheidungsunterstützung auf Mikro-Ebene. Die Zielgruppe der Studie sind die betroffenen Entscheider, wie z. B. Fertigungsplaner oder Mitglieder mittlerer und höherer Managementebenen.

Wie in Abschnitt 2.2.2.1 gefordert, wird das betrachtete System in ein Vordergrund- und ein Hintergrundsystem unterteilt. Abbildung 17 gibt einen Überblick über die grundsätzliche Festlegung des Vorder- und Hintergrundsystems. Das Vordergrundsystem stellt die betrachtete Prozesskette dar, deren Bestandteile den primären Elementen des Gesamtsystems entsprechen. Das Hintergrundsystem setzt sich aus den Vor- und Nachprozessen der Input- bzw. Output-Ressourcen der Prozesskette zusammen, die allesamt in der Technosphäre liegen. Hierbei werden zusätzlich die Input- und Output-Ressourcenströme am Übergang von Techno- zu Ökosphäre berücksichtigt. Die Elemente des Hintergrundsystems bilden die sekundären Systemelemente der Studie. Nur für das Vordergrundsystem werden die spezifischen Ressourcenströme quantifiziert. Für Vor- und Nachprozesse können entsprechend der Ausführungen in Abschnitt 2.2.2.3 qualitative und weniger genaue Daten herangezogen werden.

Die funktionelle Einheit bei der Bewertung einer Fertigungsprozesskette ist die Fertigungsaufgabe, die zur Erstellung eines Produkts durchgeführt werden muss, denn diese ist die bestimmende Funktion der Prozesskette. Bei einer vergleichenden Bewertung müssen die in Form von Vordergrundsystemen festgelegten Alternativen mindestens die mit der funktionellen Einheit definierte Fertigungsaufgabe bzw. Wertschöpfung leisten. Damit gewährleistet ist, dass die funktionelle Einheit für den Vergleich der alternativen Fertigungsprozessketten identisch definiert ist, muss die Beschreibung der Fertigungsaufgabe einen ausreichenden Abstraktionsgrad aufweisen.

Eine Allokation ist im Bereich des Vordergrundsystems meist nicht nötig, da üblicherweise eine eindeutige Zuordnung der Ressourcenströme zur funktionellen Einheit möglich ist. Kann eine Allokation nicht vermieden werden, ist im Fertigungsumfeld stets eine Zuweisung der Ressourcenströme auf Basis physikalischer Beziehungen durchführbar.

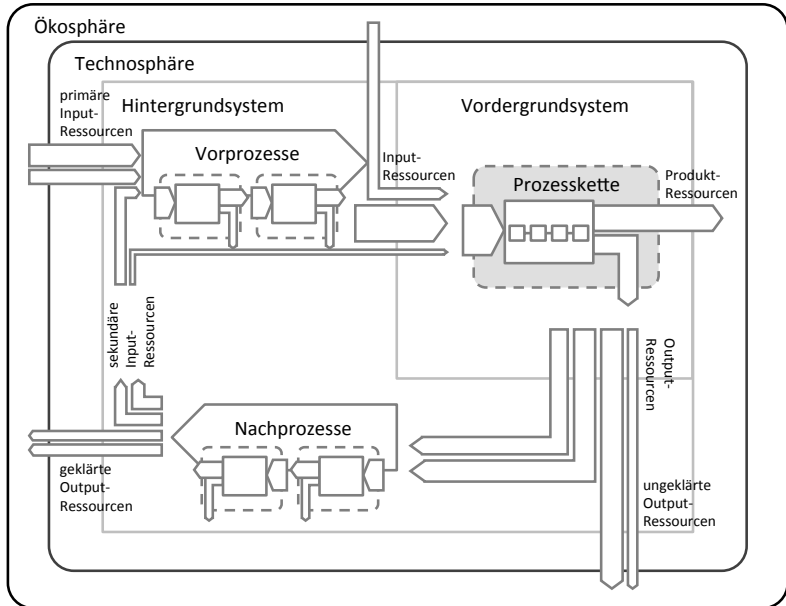


Abbildung 17: Definition von Vorder- und Hintergrundsystem

Entsprechend der obigen Ausführungen kann die Ökobilanz im Fertigungsumfeld bezüglich ihrer Ausprägung eingegrenzt werden. Es wird immer eine attributive Ökobilanz vorliegen, da es sich bei Entscheidungen über Fertigungskonzepte produzierender Unternehmen um mikroökonomische Vorgänge handelt. Außerdem werden im Bereich der Fertigungsgestaltung i. d. R. prospektive Ökobilanzen durchgeführt, da, wie in Abschnitt 1.2.3 erläutert, insbesondere während der Planungsphase Einfluss auf den Ressourcenverbrauch der Fertigung genommen werden kann.

**Sachbilanzierung.** Um die zu erhebenden Daten einheitlich und vollständig zu spezifizieren, müssen die relevanten Systemelemente identifiziert werden. Hierfür sollte eine durchgängige Modellierung der betrachteten Prozesskette und deren Ressourcenströme erreicht werden, die alle dort eingesetzten Repeaterfaktoren einheitlich erfasst. Auch die verwendeten Berechnungsvorschriften sollten entsprechend der gewählten Modellierung mit Bezug zur funktionellen Einheit konsistent beschrieben werden können.

Grundsätzlich wird für das Vordergrundsystem eine prozessorientierte Sachbilanz erstellt. Sollen auch für Upstream- und Downstream-Elemente des Hinter-

grundsystems Daten erfasst werden, können zudem Daten der ökonomischen Input-Output-Sachbilanz, Durchschnittsdaten oder generische Daten verwendet werden (vgl. Abschnitt 2.2.3.3).

**Wirkungsabschätzung.** Die Wirkungsabschätzung muss für komplexe Entscheidungen, wie sie im Fertigungsumfeld vorliegen, vorwiegend quantitative Indikatoren zur Verfügung stellen. Dieser Forderung entsprechen im besonderen Maße die naturwissenschaftlich orientierten Bewertungsansätze (vgl. Abschnitt 2.2.4). Die Umweltwirkung der Ressourcenströme kann mithilfe bereits bestehender Wirkungsimpaktoren der auswirkungsorientierten Verfahren abgeleitet werden. Für die Ressourcenverbräuche der Vor- und Nachprozesse können Indikatoren existierender, ressourcenverbrauchsorientierter Verfahren herangezogen werden. Hierfür ist ein Bewertungsvorgehen zu entwickeln, das die unterschiedlichen Ressourcen mithilfe einer Vielzahl von quantitativen, aber z. T. auch qualitativen Indikatoren vergleichbar macht. Das Ergebnis der Ressourcenbewertung sollte jeweils ein quantitativer Faktor sein, der jede Ressource individuell charakterisiert. Hierbei ist zudem zu beachten, ob es sich bei dem Ressourcenstrom um einen Input- oder Output-Ressourcenstrom handelt, da dieselbe Ressource je nach Position im Gesamtsystem eine unterschiedliche Wirkung haben kann. Um eine allgemeine Vergleichbarkeit der Faktoren zu ermöglichen, ist im Rahmen des Bewertungsvorgehens eine externe Normierung durchzuführen (vgl. Abschnitt 2.2.4.4). Außerdem ist eine Integration der Unternehmenspräferenzen in den Ressourcen-Faktor vorzunehmen (vgl. Anforderung A7).

**Auswertung.** Die Auswertung sollte über eine quantitative Bewertung der Ressourceneffizienz von Fertigungsprozessketten erfolgen. Umweltwirkungen von Ressourcen sollten außerdem explizit über den oben beschriebenen Faktor in die Entscheidung einbezogen werden. Da es sich bei der Ressourceneffizienz immer um eine relative Größe handeln wird (vgl. Abschnitt 1.2.2.2), sollten zusätzlich absolute Größen hinzugezogen werden. Dementsprechend sind zur Entscheidungsunterstützung ergänzend sowohl absolute Ressourcenverbräuche bzw. Ressourcenströme als auch Ressourcenflüsse heranzuziehen.

#### 3.4.3 Phasen der Ressourceneffizienz-Bewertung in der Fertigung

Basierend auf dem oben aufgespannten Rahmen wird in diesem Abschnitt das Ökobilanzierungsvorgehen für die Anwendung in der Fertigung standardisiert. Die verbleibenden Festlegungen, die bezüglich der Ausprägungen der Systemgrenzen, der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung und der Auswertung zu

treffen sind, werden durch ein vorgegebenes, systematisches Vorgehen unterstützt. Dies sorgt für eine zusätzliche Reduzierung des benötigten Aufwands für die Bewertung (vgl. Anforderung A8). Damit sind für die Bewertung der Ressourceneffizienz nur noch prozessketten-spezifische Aufgaben durchzuführen, aus denen sich die Phasen der in dieser Arbeit entwickelten Methode ergeben. Der gleichzeitig generische Charakter des Bewertungsvorgehens gewährleistet dennoch ausreichend Gestaltungsmöglichkeiten für eine Anwendbarkeit auf alle Technologien der DIN 8580 (2003) (vgl. Anforderung A4). Abbildung 18 zeigt die Phasen der Ökobilanzierung nach DIN 14040 (2006) und die äquivalenten Phasen der Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung.

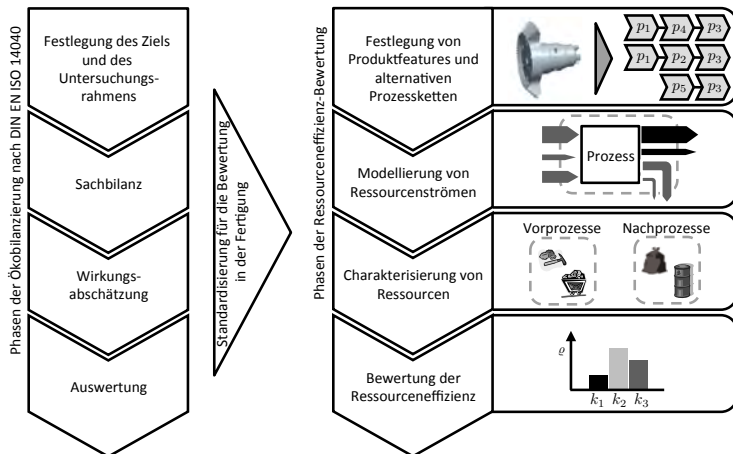


Abbildung 18: Adaption der Ökobilanzierung zur Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung

### Festlegung von Produktfeatures und alternativen Prozessketten.

Die funktionelle Einheit für die zu bewertenden Prozessketten stellt die Fertigungsaufgabe dar, die der Wertschöpfung am Produkt entspricht. Um eine Vielzahl alternativer Technologien vergleichbar zu machen, bietet sich die abstrakte und gleichzeitig fertigungsspezifische Beschreibung der Wertschöpfung in Anlehnung an fertigungsorientierte Produktfeatures an. Features repräsentieren hierbei eine spezifische Sichtweise auf die Produktbeschreibung, die mit bestimmten Eigenschaftsklassen und Phasen des Produktlebenszyklus im Zusammenhang stehen und damit verschiedenste Aktivitäten im Technologiemanagement und in der Produktentstehung unterstützen (VDI 2218 2003, BLEY ET AL. 2007). Diese Beschreibung der durchzuführenden Wertschöpfung

wird daher bereits häufig zur Generierung der alternativen Technologieketten genutzt (REINHART ET AL. 2012) und kann direkt oder in leicht modifizierter Form für die Modellierung der Produkt-Ressourcenströme verwendet werden.

Die alternativen Prozessketten stellen gegebene Eingangsgrößen für die Methode dar. Die weiteren Ausführungen gehen von der Annahme aus, dass jede dieser Prozessketten alle fertigungstechnischen Anforderungen, z. B. seitens Qualität und Prozesssicherheit, erfüllt. Die Generierung alternativer Prozessketten wird im Rahmen dieser Arbeit folglich nicht behandelt. Geeignete Ansätze zur Generierung von Technologieketten liefern u. a. FALLBÖHMER (2000), MÜLLER (2008) oder REINHART ET AL. (2012). Ausgehend von den gegebenen Alternativen müssen die primären Systemelemente festgelegt werden, damit die Vergleichbarkeit gewährleistet ist und die Grundlagen für die Interpretation der finalen Bewertungsergebnisse bekannt sind. Dies erfolgt über die Modellierung der Prozesskette als Vordergrundsystem, welche in Abschnitt 4.2 ausgeführt wird.

**Modellierung von Ressourcenströmen.** Sind die primären Systemelemente und ggf. getroffenen Einschränkungen bezüglich der zu berücksichtigenden Ressourcen bekannt, können die relevanten Ressourcenströme identifiziert, modelliert und quantifiziert werden. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die bewertungsorientierte Modellierung der Ressourcenströme, d. h. es wird entsprechend der Erläuterungen in Abschnitt 3.3.1 sowohl zwischen materiellen und energetischen Ressourcen als auch zwischen Input-, Output- und Produkt-Ressourcen unterschieden. Eine ausführliche Beschreibung der durchzuführenden bewertungsorientierten Modellierung der Ressourcenströme erfolgt in Abschnitt 4.3.

**Charakterisierung von Ressourcen.** Für die Charakterisierung der Ressourcen wird ein Vorgehen zur systematischen Ableitung des charakteristischen Faktors einer Ressource entwickelt. In diesem Zusammenhang wird zunächst eine Kriterienhierarchie für Ressourceneffizienz definiert. In Anbetracht der Vielzahl zu integrierender Kriterien in Form der Wirkungsindikatoren wird sich das Vorgehen an den multikriteriellen Bewertungsansätzen orientieren. Hierbei soll es möglich sein, sowohl die Kriterien bzgl. der Ressourcenverbräuche von Vor- und Nachprozessen sowie bzgl. der Umweltwirkung als auch die Präferenzen des Entscheiders sinnvoll und nachvollziehbar zu einem charakteristischen Faktor der jeweiligen Ressource zu aggregieren. Es wird angestrebt, dass ein Großteil der Schritte des Vorgehens zentral und nur einmalig durchgeführt werden muss, um den Aufwand für die Bewertung zu reduzieren (vgl. Anforderung

A8). Einige Schritte erfordern jedoch für jede neue Ressource einen erneuten Durchlauf. Das detaillierte Vorgehen wird in Kapitel 5 beschrieben.

**Bewertung der Ressourceneffizienz.** Für die quantitative Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung wird im Rahmen dieser Arbeit eine Kennzahl definiert, die sich wiederum aus weiteren Kennzahlen zusammensetzt (vgl. Anforderung A1). In ihrer Gesamtheit ermöglichen diese eine Entscheidung über die Vorteilhaftigkeit von vergleichbaren Prozessketten im Bezug auf deren Verbrauch an natürlichen Ressourcen. Diese Kennzahlen basieren auf den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Ressourcenströmen einer Fertigungsprozesskette und leiten sich von der Grunddefinition von Effizienz ab, wie sie in Abschnitt 1.2.2.2 eingeführt wurde:

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Wertschöpfung an dem Produkt als Nutzen der Fertigungsprozesskette in Form einer absoluten, physischen Größe definiert. Der Nutzen umfasst genau die definierten Ressourcenströme, die im besten Fall das Produkt formen und damit dem optimalen Ressourcenbedarf für die Fertigung des Produkts entsprechen<sup>16</sup>. Der Aufwand entspricht den tatsächlich auftretenden Ressourcenströmen für die Fertigung des Produkts. Die aus der Definition von Effizienz und den Ressourcenströmen einer Prozesskette resultierenden Kennzahlen werden im folgenden Abschnitt 3.4.4 eingeführt. Sie bilden den Rahmen für die in Kapitel 4 und Kapitel 5 vorgestellten Bausteine für die Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung.

### 3.4.4 Kennzahlen zur Ressourceneffizienz-Bewertung in der Fertigung

Entsprechend der in Abschnitt 3.3.1 eingeführten Unterteilung zwischen materiellen und energetischen Ressourcen werden zunächst zwei getrennte Effizienzkennzahlen formuliert (vgl. Anforderung A5). Dies liegt insbesondere in der existierenden Einheitenproblematik begründet, die verhindert, dass materielle und energetische Ressourcenströme sinnvoll im Rahmen einer Kennzahl miteinander verrechnet werden können<sup>17</sup>. Die beiden Kennzahlen werden im Folgenden als Materialeffizienz und Energieeffizienz bezeichnet. Aufbauend auf

<sup>16</sup> Wirkungsgradverluste oder sonstige nicht unmittelbar wertschöpfende Ressourcenströme werden folglich für den besten Fertigungsfall ausgeschlossen.

<sup>17</sup> Zwar existieren Hilfsgrößen, wie die Steinkohleeinheit oder das Öläquivalent, die es erlauben, Energie in Masseinheiten umzurechnen, dies führt jedoch zu einer Verzerrung der wahren Ressourcenströme und erschwert damit die Interpretation der Bewertungsergebnisse.

diesen Kennzahlen wird die Ressourceneffizienz als zentrale Bewertungsgröße definiert. Indirekt energetische Ressourcen (vgl. Abschnitt 3.3.1) gehen sowohl in die Materialeffizienz als auch in die Energieeffizienz ein, da es zum einen gilt bei einer separaten Betrachtung der Kennzahlen weiterhin korrekte Aussagen zu erhalten. Zum anderen wird die Bewertung so der Dualität der Ressourcen und ihrer Auswirkungen gerecht. Da bei der Bestimmung der Ressourceneffizienz zwei relative Größen miteinander verrechnet werden, besteht außerdem keine Gefahr von Redundanz.

Um die Ausprägung der Auswirkungen der Input- und Output-Ressourcenströme bei der Bewertung der Ressourceneffizienz explizit zu berücksichtigen, erfolgt eine getrennte Definition der oben genannten Kennzahlen im engeren und weiteren Sinne. Die *Kennzahlen im engeren Sinne* berücksichtigen ausschließlich die direkten Ressourcenströme der Prozesskette und beschränken sich auf die Untersuchung des Vordergrundsystems. Vorgelagerte Prozesse zur Erstellung der Input-Ressourcen und nachgelagerte Prozesse zur Behandlung der Output-Ressourcen werden nicht beachtet. Sollen jedoch die Auswirkungen auf die natürlichen Ressourcen umfassend betrachtet werden, so müssen die Definitionen der Kennzahlen erweitert werden. Bei den *Kennzahlen im weiteren Sinne* werden charakteristische Ressourcenfaktoren für jeden Produkt-, Input- und Output-Ressourcenstrom einbezogen, die die Umweltwirkung dieser Ressourcen sowie ihrer Vor- bzw. Nachprozesse widerspiegeln (vgl. Anforderung A5 und Anforderung A6). Damit werden bei der Bewertung Vorder- und Hintergrundsystem berücksichtigt.

Zunächst werden die Kennzahlen im engeren Sinne eingeführt, d.h. die Untersuchungen beschränken sich auf die direkt durch die Prozesskette verursachten Ressourcenströme. Im Rahmen der *Materialeffizienz* bilden die Materialströme, die in das optimale, finale Produkt eingehen, den Nutzen. Der Aufwand ergibt sich zum einen aus den Input-Materialströmen und zum anderen aus den Output-Materialströmen der Fertigungsprozesskette. Diese Definition weicht von der klassischen Definition des Wirkungsgrads ab, der ausschließlich den Input als Aufwand anführt. Diese Abweichung ist jedoch notwendig, um im Zusammenhang mit dem Verbrauch der natürlichen Ressourcen ein vollständiges Bild abzugeben. Denn nicht nur der Input führt zu einem Ressourcenverbrauch seitens der ökologischen Quellen, sondern auch der Output bringt i. d. R. weiteren Aufwand für die ökologischen Senken mit sich. Die *Materialeffizienz im engeren Sinne*  $\mu_{ieS}$  wird wie folgt definiert:

$$\mu_{ieS} := \frac{\sum_{j \in J_M} r_{pro\ j}}{\sum_{j \in J_M} r_{in\ j} + \sum_{j \in J_M} r_{out\ j}} \quad (3.1)$$



Bei der *Energieeffizienz* bilden die Energieströme zur Erzeugung der gewünschten Eigenschaften des Produkts den Nutzen. Im Gegensatz zur Materialeffizienz werden nur die Input-Energieströme als Aufwand angesetzt. Ausschlaggebend hierfür ist, dass die Output-Energie i. d. R. in Form von Wärme auftritt und damit für die Umwelt häufig keinen Aufwand darstellt. Für den Fall, dass das Umfeld gestört wird und aufgrund der Abwärme eine Kühlung benötigt wird, so wird der Energiebedarf des Kühlaggregats als zusätzlicher Input-Energiestrom bei der Bewertung als Aufwand berücksichtigt. Die *Energieeffizienz im engeren Sinne*  $\varepsilon_{ieS}$  wird somit folgendermaßen definiert:

$$\varepsilon_{ieS} := \frac{\sum_{j \in J_E} r_{pro\ j}}{\sum_{j \in J_E} r_{in\ j}} \quad (3.2)$$

Die *Ressourceneffizienz* entspricht dem gewichteten arithmetischen Mittel von Material- und Energieeffizienz. Der Gewichtungsfaktor  $\alpha$  wird entsprechend der Entscheiderpräferenzen festgelegt. Die *Ressourceneffizienz im engeren Sinne*  $\varrho_{ieS}$  berechnet sich wie folgt:

$$\varrho_{ieS} = \alpha \cdot \mu_{ieS} + (1 - \alpha) \cdot \varepsilon_{ieS}, \quad \alpha \in [0, 1] \quad (3.3)$$

Sollen neben den direkten Ressourcenströmen auch die Umweltwirkungen der Input- und Output-Ressourcenströme sowie der Ressourcenverbrauch der Vor- und Nachprozesse bewertet werden, so bedarf es, wie bereits erwähnt, einer Erweiterung der oben angegebenen Definitionen von Material- und Energieeffizienz. Diese Erweiterung wird durch die Einführung von charakteristischen Ressourcenfaktoren umgesetzt. Die Menge der Ressourcenfaktoren der Input-Ressourcen  $\Omega_{in}$  und die Menge der Ressourcenfaktoren der Output-Ressourcen  $\Omega_{out}$  werden wie folgt definiert:

$$\Omega_{in} := \left\{ \omega_{in\ j} \mid \omega_{in\ j} \text{ ist Input-Ressourcenfaktor} \right. \\ \left. \text{der } j\text{-ten Ressource; } j \in J \right\} \quad (3.4)$$

$$\Omega_{out} := \left\{ \omega_{out\ j} \mid \omega_{out\ j} \text{ ist Output-Ressourcenfaktor} \right. \\ \left. \text{der } j\text{-ten Ressource; } j \in J \right\} \quad (3.5)$$

Die Ressourcenfaktoren für die Produkt-Ressourcenströme entsprechen im Falle der Materialeffizienz den Input-Ressourcenfaktoren, da insbesondere aus Sicht der Fertigung die Auswirkungen der Produkte als Input-Ressourcenströme von Relevanz sind. Die Auswirkungen der Produkte in Form von Output-Ressourcenströmen werden erst am Ende ihres Lebenszyklus relevant. Zu diesem Zeitpunkt befinden sie sich jedoch bereits beim Kunden und haben die

gesetzten Systemgrenzen für die Bewertung der Fertigung verlassen. Damit ergibt sich die Definition der *Materialeffizienz im weiteren Sinne*  $\mu$  zu:

$$\mu := \frac{\sum_{j \in J_M} \omega_{in\ j} \cdot r_{pro\ j}}{\sum_{j \in J_M} \omega_{in\ j} \cdot r_{in\ j} + \sum_{j \in J_M} \omega_{out\ j} \cdot r_{out\ j}} \quad (3.6)$$

Bei der Energieeffizienz stimmen die Ressourcenfaktoren für die Produkt-Ressourcenströme mit den Input-Ressourcenfaktoren der Wirkenergie überein. Die Wirkenergie ist die Energie, die die gewünschten Eigenschaften des Produkts erzeugt und damit direkt dem Produkt zugeordnet werden kann. Die *Energieeffizienz im weiteren Sinne*  $\varepsilon$  wird wie folgt definiert:

$$\varepsilon := \frac{\sum_{j \in J_E} \omega_{in\ j} \cdot r_{pro\ j}}{\sum_{j \in J_E} \omega_{in\ j} \cdot r_{in\ j}} \quad (3.7)$$

Entsprechend wird im Rahmen dieser Arbeit die *Ressourceneffizienz im weiteren Sinne*  $\varrho$  festgelegt als:

$$\varrho := \alpha \cdot \mu + (1 - \alpha) \cdot \varepsilon, \quad \alpha \in [0, 1] \quad (3.8)$$

Der Wertebereich für jede der oben definierten Kennzahlen liegt zwischen 0 und 1 bzw. zwischen 0 und 100%.

## 4 Modellierung von Ressourcenströmen

### 4.1 Allgemeines

Dieses Kapitel stellt das Vorgehen zur Modellierung der direkten Ressourcenströme vor. Dafür wird zunächst eine formale, ressourcenstromorientierte Beschreibung einer Fertigungsprozesskette sowie ihrer relevanten Bestandteile eingeführt (vgl. Abschnitt 4.2). Diese Systembeschreibung dient der Abbildung und Strukturierung des Vordergrundsystems als Vorbereitung zur eigentlichen Quantifizierung der Ressourcenströme, welche bei der in Abschnitt 3.4.4 vorgestellten Bewertung einer Fertigungsprozesskette eingesetzt werden. Anschließend werden die benötigten Informationen zur Bestimmung der Ressourcenströme aufgeführt und Möglichkeiten zu deren Herleitung bzw. Berechnung dargestellt (vgl. Abschnitt 4.3). Schließlich erfolgen einige grundsätzliche Anmerkungen zum Vergleich alternativer Prozessketten (vgl. Abschnitt 4.4).

### 4.2 Generische Modellierung von Fertigungsprozessketten

#### 4.2.1 Grundlagen der Modellierung

Unter einem Modell wird die vereinfachte Nachbildung eines Originalsystems verstanden. Das Modell muss dabei das Originalsystem im Hinblick auf den Zweck seiner Realisierung hinreichend beschreiben. Mithilfe der Systemtheorie können die verschiedensten Arten von realen Systemen modelliert werden. Damit ist das System ein sehr allgemeiner und abstrakter Begriff, der in vielen Wissenschaftsdisziplinen zur Anwendung kommt (DÖRING 2011, S. 1). Ein *System* besteht aus sogenannten Systemelementen, die i. d. R. selbst nicht mehr teilbar sind. Außerdem kann ein System Subsysteme haben, die aus einer Teilmenge der Systemelemente des Gesamtsystems bestehen. Zwischen den Systemelementen eines Systems können Wechselbeziehungen, sogenannte Relationen, bestehen. Systeme lassen sich u. a. formal bzw. mathematisch modellieren (SAUERBIER 1999, S. 17 ff.).

Die folgende generische Modellierung der Prozesskette als Teil der Fertigung findet in Anlehnung an die allgemeine Systemtheorie statt, wie sie auch ROPOHL (1979, S. 54 ff.) zur Beschreibung technischer Systeme heranzieht. Die formale Beschreibung eines sogenannten Sachsystems nach ROPOHL wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit entsprechend des Ziels, nämlich der Modellierung der Ressourcenströme einer Prozesskette, neu definiert. Die Systembeschreibung wird so am Zweck der Modellierung ausgerichtet, wie dies von SAUERBIER (1999, S. 18) gefordert wird. Die grundlegenden Definitionen für die formale

Beschreibung eines Systems, eines Subsystems und der Systemelemente werden im Folgenden eingeführt.

Attribute geben die Ausprägung der Eigenschaften eines Systemelements wieder. Die Definition der Attribute erfolgt über die Mengenschreibweise, welche bereits in Kapitel 3 bei der Beschreibung der Ressourcenströme und -flüsse zur Anwendung gekommen ist. Funktionen sind Abbildungen von einer Definitionsmenge von Attributen in eine Zielmenge von Attributen. Das  $i$ -te Systemelement  $u_i$  ist daher über das Mengensystem seiner Attribute  $\mathfrak{A}_i$  und die Menge seiner Funktionen  $\mathfrak{F}_i$  definiert, wobei  $I_{\mathfrak{U}}$  die Indexmenge der Systemelemente ist:

$$u_i = (\mathfrak{A}_i, \mathfrak{F}_i), i \in I_{\mathfrak{U}}$$

Aufbauend auf den Systemelementen ist nun die Definition von Systemen der Systemmenge  $\mathfrak{Z}$  möglich. Das  $i$ -te System  $z_i$  besteht aus einem eigenen Mengensystem von Attributen  $\mathfrak{A}_i$ , der Menge seiner Systemelemente  $\mathfrak{U}_i$  und der Menge seiner eigenen Funktionen  $\mathfrak{F}_i$ . Außerdem hat ein System ggf. Subsysteme, die in der Subsystem-Menge  $\mathfrak{S}_i$  mit der Indexmenge  $I_{\mathfrak{S}}$  zusammengefasst werden und deren Elemente  $s_i$  dieselbe Form wie  $z_i$  aufweisen. Damit gilt für ein System  $z_i$  folgende Definition, mit  $I_{\mathfrak{Z}}$  als System-Indexmenge:

$$z_i = (\mathfrak{A}_i, \mathfrak{U}_i, \mathfrak{F}_i, \mathfrak{S}_i), i \in I_{\mathfrak{Z}}$$

## 4.2.2 Ressourcenstromorientiertes Systemmodell

### 4.2.2.1 Überblick

Die in Abschnitt 3.3.1 eingeführte Darstellung (vgl. Abbildung 14) zeigt eine Blackbox-Betrachtung der Ressourcenströme einer Prozesskette. Im Gegensatz dazu stellt Abbildung 19 exemplarisch mögliche interne Ressourcenströme einer Prozesskette dar und bildet damit die Whitebox-Betrachtung der Prozesskette hinsichtlich ihrer Ressourcenströme ab.

Weiterhin sind die unterschiedlichen Systemgrenzen dargestellt, die jeweils die Ressourcenstromsicht des bilanzierten Objekts widerspiegeln. Die eigentlichen Verursacher der Ressourcenströme sind die sogenannten Verbraucher (z. B. Betriebsmittel). Um sie wird die erste Systemgrenze, die Systemgrenze auf *Verbraucherebene*, gelegt. Hierbei werden zusätzlich zu den aus Abbildung 14 bekannten Ressourcenströmen Zwischenprodukt-Ressourcenströme erkennbar, welche als Sonderfall zu betrachten sind und in Abschnitt 4.2.2.2 bzw. Abschnitt 4.2.2.3 erläutert werden. Die *Zwischenprodukt-Ressourcenströme* sind Zwischenzustände des Produkts auf seinem Weg durch die Fertigungsprozesskette. Die für die Bewertung relevanten Ressourcenströme sind allerdings allein die Produkt-Ressourcenströme  $r_{\text{pro } j}$ , die die Prozesskette schließlich als (End-)Produkt

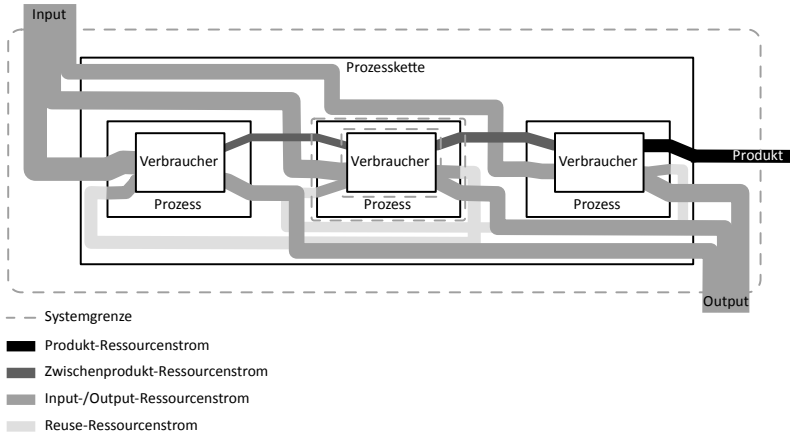


Abbildung 19: Interne Ressourcenströme einer Fertigungsprozesskette

verlassen, da an der Systemgrenze der Prozesskette alle Zwischenprodukt-Ressourcenströme entweder in den Produkt- oder Output-Ressourcenströmen enthalten sind. Die Menge der Zwischenprodukt-Ressourcenströme wird wie folgt festgelegt:

$$\hat{R} := \{ \hat{r}_j \mid \hat{r}_j \text{ ist Zwischenprodukt-Ressourcenstrom} \\
 \text{der } j\text{-ten Ressource, } j \in J \}$$

Die zweite Systemgrenze wird auf der *Prozessebene* angesetzt. Dabei werden neben den bereits bekannten Ressourcenströmen Kreislauf-Ressourcenströme innerhalb der Prozesskette sichtbar. Die Kreislauf-Ressourcenströme der Prozesskette werden im Rahmen dieser Arbeit als Reuse-Ressourcenströme bezeichnet. *Reuse-Ressourcenströme* beinhalten nur Ressourcen, die innerhalb der Fertigungsprozesskette fließen, d. h. es ist keine nennenswerte Aufbereitung der Ressourcen notwendig. Ist eine Aufbereitung im unmittelbaren Fertigungsumfeld erforderlich, wird diese zu einem separaten Prozess und damit Teil der allgemeinen Ressourcenstrombetrachtung der Prozesskette. Für eine aufwendigere Aufbereitung verlassen die Ressourcenströme die Systemgrenze der Prozesskette und werden den Input- bzw. Output-Ressourcenströmen zugeordnet. Analog zu den bisher eingeführten Ressourcenströmen wird die Menge der Reuse-Ressourcenströme wie folgt definiert:

$$\tilde{R} := \{ \tilde{r}_j \mid \tilde{r}_j \text{ ist Reuse-Ressourcenstrom der } j\text{-ten Ressource, } j \in J \}$$

Die dritte, bereits bekannte Systemgrenze ist die auf *Prozesskettenebene*. Sie zeigt die Ressourcenströme, die zur Bewertung der Ressourceneffizienz benötigt werden. Um auf diese Ressourcenströme schließen zu können, müssen alle Ressourcenströme an den Systemgrenzen der Prozesse sowie der Verbraucher quantifiziert werden.

Um die Grundlage für eine Quantifizierung der Ressourcenströme allgemein zu beschreiben, wird die Fertigungsprozesskette als System betrachtet, deren Subsysteme die einzelnen Prozesse bilden. Ein Fertigungsprozess als komplexeste Variante eines Prozesses setzt sich wiederum aus der ausgeführten Technologie, den zu erzeugenden Produktfeatures und den Verbrauchern als Systemelemente zusammen. Verbraucher können je nach Detaillierungsgrad der Bilanzierung das Betriebsmittel selbst oder die Komponenten eines Betriebsmittels sein. Die aufgeführten Systemelemente und Subsysteme einer Prozesskette (System) sind in Abbildung 20 exemplarisch dargestellt und werden im Folgenden näher beschrieben. Zudem erfolgt für jedes Systemelement, Subsystem bzw. System eine formale Definition, wie sie in Abschnitt 4.2.1 eingeführt wurde.

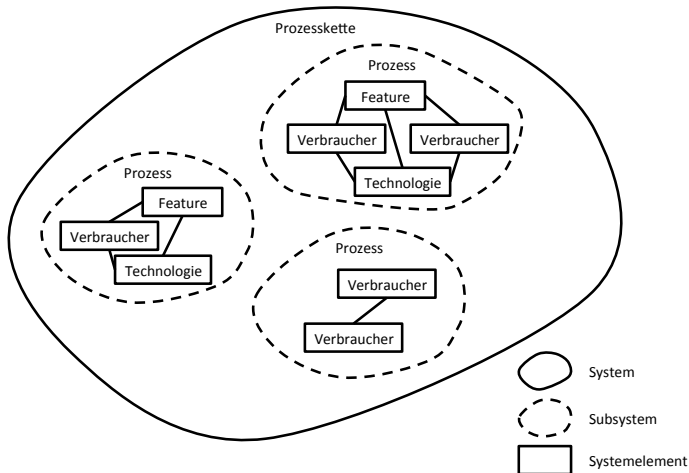


Abbildung 20: Exemplarische Fertigungsprozesskette in Systemdarstellung

#### 4.2.2.2 Systemelemente

Als Grundlage der Systemdefinitionen für die Prozesse bzw. die Prozesskette werden die einzelnen Systemelemente aufgeführt und ausformuliert. Die Systemelemente werden von dem in Abschnitt 1.2.3 definierten Begriff des Fertigungs-

prozesses abgeleitet, der den Einsatz einer Technologie auf einem bestimmten Betriebsmittel (bzw. Verbraucher) zur Erfüllung einer Fertigungsaufgabe beschreibt. Die zu modellierenden Systemelemente einer Fertigungsprozesskette sind:

- Technologien
- Produktfeatures
- Verbraucher

**Technologien.** Die jeweils ausgeführte Technologie beeinflusst die Ressourcenströme des Prozesses und wird daher im Rahmen der ressourcenstromorientierten Modellierung definiert. Bei der Durchführung eines Fertigungsprozesses werden eine oder mehrere Technologien angewendet. Sekundäre Prozesse enthalten keine Technologien nach DIN 8580 (2003). Die Ausprägung einer Technologie lässt sich über deren Parameter beschreiben. Die Menge der Parameter  $G$  ist wie folgt definiert, wobei  $I_G$  die Indexmenge der Technologie-Parameter darstellt:

$$G := \{g_i \mid g_i \text{ ist } i\text{-ter Parameter einer Technologie, } i \in I_G\}$$

Die Parameter der Technologie werden dieser als Attribute zugeordnet. Außerdem hat die Technologie keine Funktionen, was durch die leere Menge ausgedrückt wird. Eine formale Beschreibung des Systemelements Technologie erfolgt in Gleichung (4.1). Die Definition der Menge der Technologien einer Prozesskette  $V$  mit der Technologie-Indexmenge  $I_V$  lautet:

$$\begin{aligned}
 V &:= \{v_i \mid v_i \text{ ist } i\text{-te Technologie der Prozesskette, } i \in I_V\} \\
 v_i &= (\mathfrak{A}_i, \mathfrak{F}_i), \text{ wobei} \\
 \mathfrak{A}_i &= \{g \in G \mid g \text{ ist Parameter der Technologie } v_i\} \\
 \mathfrak{F}_i &= \emptyset
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

**Produktfeatures.** Das Ziel eines Fertigungsprozesses ist die Erzeugung eines oder mehrerer Produktfeatures. Features werden in der VDI 2218 (2003) als informationstechnische Elemente definiert, die Bereiche von besonderem technischen Interesse von Produkten darstellen. Die VDI 2218 (2003) unterscheidet zwischen Form-Features und semantischen Features:

- *Form-Features* sind strukturorientierte Gruppierungen geometrischer Elemente, die die Gestalteigenschaften eines Produktmodells wiedergeben.

- *Semantische Features* stellen i. d. R. die Verbindung eines Form-Features mit weiteren Eigenschaften des Produkts dar.

Sekundäre Prozesse führen zu keiner Wertschöpfung am Produkt und enthalten damit keine Features. Produktfeatures werden bei der ressourcenstromorientierten Modellierung insbesondere für die Bestimmung der energetischen Produkt-Ressourcenströme benötigt. Während materielle Ressourcen dem Produkt eindeutig zugeordnet werden können, ist dies bei Energie nicht ohne Weiteres möglich. Der Grund hierfür ist, dass Energie größtenteils nicht im Produkt gespeichert wird, sondern alleine zur Veränderung des Produkts bzw. zur Erzeugung der Produktfeatures benötigt wird. Der energetische Produkt-Ressourcenstrom beinhaltet somit streng genommen nicht die Energie, welche in das Produkt übergeht, sondern jene Energie, die für eine bestimmte Veränderung des Produkts erforderlich ist. Für die Erzeugung eines jeden Features muss ein entsprechender Referenz-Energiebetrag festgelegt werden, der mithilfe einer quantitativen Bezugsgröße für das vorliegende Produkt skaliert werden kann. Die Menge der Referenz-Energiebeträge  $H$  mit der Indexmenge  $I_H$  ist:

$$H := \{h_i \mid h_i \text{ ist } i\text{-ter Referenz-Energiebetrag, } i \in I_H\}$$

Für die Menge der Bezugsgrößen  $D$  mit der Indexmenge  $I_D$  gilt:

$$D := \{d_i \mid d_i \text{ ist } i\text{-te Bezugsgröße, } i \in I_D\}$$

Die Menge der Produktfeatures  $F$  mit der Indexmenge  $I_F$  entspricht:

$$F := \{f_i \mid f_i \text{ ist } i\text{-tes Produktfeature, } i \in I_F\}$$

Das Mengensystem der Attribute eines Features  $f_i$  besteht aus seinen Referenz-Energiebeträgen  $h$ , seinen Bezugsgrößen  $d$  und dem energetischen Produkt-Ressourcenstrom  $r_{\text{pro}}$ . Energetische Produkt-Ressourcenströme lassen sich als Abbildung  $\varphi_{\text{pro}}$  des kartesischen Produkts von  $H$  und  $D$  in die Menge der Produkt-Ressourcenströme beschreiben. Außerdem ist  $o$  die Dimension der Produkt-Ressourcenströme. Ein Feature wird damit wie folgt festgelegt:

$$f_i = (\mathfrak{A}_i, \mathfrak{F}_i), \text{ wobei}$$

$$\mathfrak{A}_i = \left\{ \begin{array}{l} \{h \in H \mid h \text{ ist Referenz-Energiebetrag des Features } f_i\}, \\ \{d \in D \mid d \text{ ist Bezugsgröße des Produktfeatures } f_i\}, \\ \{r_{\text{pro } j} \in R_{\text{pro}} \mid j \in J_E \text{ und } r_{\text{pro } j} \text{ ist Produkt-} \\ \text{Ressourcenstrom des Produktfeatures } f_i\} \end{array} \right\}$$

$$\mathfrak{F}_i = \{\varphi_{\text{pro}} : H \times D \rightarrow R_{\text{pro}}^o, (h, d) \mapsto \mathbf{r}_{\text{pro}} := \varphi_{\text{pro}}(h, d)\}$$



**Verbraucher.** Die Fertigungsumgebung, in der eine Prozesskette physisch umgesetzt wird, besteht aus unterschiedlichen Arten von Betriebsmitteln. Diese können beispielsweise Fertigungsbetriebsmittel, Transportmittel oder Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung sein. Ein Betriebsmittel besteht i. d. R. aus mehreren Komponenten. Komponenten können im Hinblick auf die Quantifizierung der Ressourcenströme einzelne Verbraucher  $b_i$  darstellen. Im Falle einer detaillierten Betrachtung werden daher alle Komponenten als Verbraucher modelliert, die Ressourcenströme verursachen. Bei einer weniger detaillierten Modellierung kann auch das gesamte Betriebsmittel als Verbraucher abgebildet werden. In bestimmten Fällen ist es sinnvoll manche Ressourcenströme einem aggregierten Verbraucher zuzuordnen, in anderen Fällen bietet sich die detaillierte Modellierung der Ressourcenströme für jede verbrauchende Komponente an. So empfiehlt es sich bei der Quantifizierung häufig, die materiellen Ressourcenströme auf das gesamte Betriebsmittel zu beziehen und die energetischen Ressourcenströme für jede relevante Komponente des Betriebsmittels abzubilden. Die Menge der Verbraucher einer Prozesskette  $B$  mit der Indexmenge  $I_B$  ist wie folgt definiert:

$$B := \{b_i \mid b_i \text{ ist } i\text{-ter Verbraucher der Prozesskette, } i \in I_B\}$$

Der Verbraucher  $b_i$  weist i. d. R. mehrere Zustände  $z$  auf. Die Menge der Zustände eines Verbrauchers  $Z$  mit der Indexmenge  $I_Z$  wird festgelegt als:

$$Z := \{z_i \mid z_i \text{ ist } i\text{-ter Verbraucher-Zustand, } i \in I_Z\}$$

Außerdem verursachen die Verbraucher Input- bzw. Output-Ressourcenströme. Dabei können Input-Ressourcenströme den Verbraucher in Form des Zwischenprodukts verlassen, wie dies beispielsweise bei fügenden Prozessen häufig der Fall ist, bzw. eingehende Zwischenprodukt-Ressourcenströme können im Verbraucher zu Output-Ressourcenströmen werden, z. B. bei spanenden Prozessen. Abbildung 21 stellt die Ressourcenstrom-Sicht des bilanzierten Verbrauchers dar. Bei den Input- und Output-Ressourcenströmen eines Verbrauchers handelt es sich um Brutto-Ressourcenströme. Diese werden im Folgenden durch einen Unterstrich kenntlich gemacht (z. B.  $\underline{r}$ ). In Abschnitt 4.2.2.3 werden die Brutto-Ressourcenströme auf Prozessebene weiter erläutert.

In der Regel werden Inputs und Outputs bei Verbrauchern als Ressourcenflüsse angegeben. Erst nach Multiplikation mit den entsprechenden Arbeitszeiten können die auftretenden Ressourcenströme bestimmt werden. Der jeweilige Zustand legt die Input- und Output-Ressourcenflüsse eines Verbrauchers fest. Es existiert daher eine Abbildung  $\underline{f}_{\text{in}}$ , die jedem Zustand des Verbrauchers einen Input-Ressourcenfluss-Vektor zuweist. Analog kann eine Abbildung  $\underline{f}_{\text{out}}$  für die Zuordnung der Zustände zu den jeweiligen Output-Ressourcenfluss-Vektoren

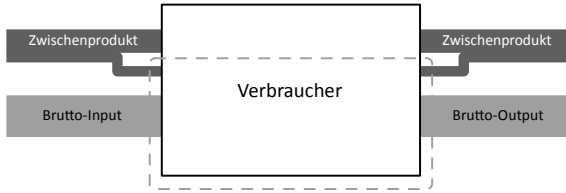


Abbildung 21: Ressourcenströme eines Verbrauchers

formuliert werden. Die Input- und Output-Ressourcenflüsse des Verbrauchers sowie dessen Zustände formen das Mengensystem seiner Attribute. Die beiden Abbildungen bilden die Funktionsmenge des Verbrauchers. Die formale systemtheoretische Beschreibung eines Verbrauchers  $b_i$  erfolgt in Gleichung (4.2), wobei aus oben genannten Gründen die Zwischenprodukt-Ressourcenströme nicht aufgeführt werden:

$$\begin{aligned}
 b_i &= (\mathfrak{A}_i, \mathfrak{F}_i), \text{ wobei} \\
 \mathfrak{A}_i &= \left\{ \left\{ z \in Z \mid z \text{ ist Zustand des Verbrauchers } b_i \right\}, \right. \\
 &\quad \left\{ \underline{r}'_{\text{in}} \in \underline{R}'_{\text{in}} \mid \underline{r}'_{\text{in}} \text{ ist Brutto-Input-Ressourcenfluss des} \right. \\
 &\quad \left. \text{Verbrauchers } b_i \right\}, \left\{ \underline{r}'_{\text{out}} \in \underline{R}'_{\text{out}} \mid \underline{r}'_{\text{out}} \text{ ist Brutto-Output-} \right. \\
 &\quad \left. \left. \text{Ressourcenfluss des Verbrauchers } b_i \right\} \right\} \quad (4.2) \\
 \mathfrak{F}_i &= \left\{ \underline{f}_{\text{in}} : Z \rightarrow \underline{R}'_{\text{in}}{}^n, z \mapsto \underline{r}'_{\text{in}} := \underline{f}_{\text{in}}(z), \right. \\
 &\quad \left. \underline{f}_{\text{out}} : Z \rightarrow \underline{R}'_{\text{out}}{}^m, z \mapsto \underline{r}'_{\text{out}} := \underline{f}_{\text{out}}(z) \right\}
 \end{aligned}$$

Ist  $n$  die Dimension der Input-Ressourcenflüsse  $\underline{r}'_{\text{in } i}$  und  $m$  die Dimension der Output-Ressourcenflüsse  $\underline{r}'_{\text{out } i}$ , können für jeden Zustand  $i$  eines Verbrauchers folgende Vektoren definiert werden:

$$\begin{aligned}
 \underline{r}'_{\text{in } i} &:= \underline{f}_{\text{in}}(z_i) = \begin{pmatrix} r'_{\text{in } 1i} \\ \vdots \\ r'_{\text{in } ni} \end{pmatrix} \\
 \underline{r}'_{\text{out } i} &:= \underline{f}_{\text{out}}(z_i) = \begin{pmatrix} r'_{\text{out } 1i} \\ \vdots \\ r'_{\text{out } mi} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Ist außerdem  $l$  die Anzahl aller Zustände des Verbrauchers  $b_i$ , so lassen sich die Ressourcenflüsse in einer Input-Ressourcenfluss-Zustands-Matrix  $\underline{\mathbf{R}}'_{\text{in}} \in \underline{\mathbb{R}}'^{m \times l}_{\text{in}}$  und einer Output-Ressourcenfluss-Zustands-Matrix  $\underline{\mathbf{R}}'_{\text{out}} \in \underline{\mathbb{R}}'^{m \times l}_{\text{out}}$  wie folgt darstellen:

$$\underline{\mathbf{R}}'_{\text{in}} := (\underline{\mathbf{r}}'_{\text{in } 1}, \dots, \underline{\mathbf{r}}'_{\text{in } l}) = \begin{pmatrix} r'_{\text{in } 11} & \cdots & r'_{\text{in } 1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{\text{in } n1} & \cdots & r'_{\text{in } nl} \end{pmatrix}$$

$$\underline{\mathbf{R}}'_{\text{out}} := (\underline{\mathbf{r}}'_{\text{out } 1}, \dots, \underline{\mathbf{r}}'_{\text{out } l}) = \begin{pmatrix} r'_{\text{out } 11} & \cdots & r'_{\text{out } 1l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{\text{out } m1} & \cdots & r'_{\text{out } ml} \end{pmatrix}$$

#### 4.2.2.3 (Sub-)Systeme

**Prozesse.** Entsprechend der Definition in Abschnitt 1.2.3 besteht eine Prozesskette als System aus mehreren Einzelprozessen, welche Subsysteme darstellen. Als Prozess können zum einen die primären Prozesse, d. h. die Fertigungsprozesse, und zum anderen die sekundären Prozesse wie beispielsweise Transport- oder Handhabungsprozesse bezeichnet werden. Die Menge der Prozesse  $P$  mit der Indexmenge  $I_P$  einer Fertigungsprozesskette wird im Rahmen dieser Arbeit wie folgt festgelegt:

$$P := \{p_i \mid p_i \text{ ist } i\text{-ter Prozess der Prozesskette, } i \in I_P\}$$

Ein Prozess setzt sich aus mehreren Prozessschritten zusammen. Die Arbeitsvorgänge bzw. Prozessschritte  $s_i$  und deren Dauer, die sogenannten Arbeitszeiten  $t_i$ , werden i. d. R. in der Fertigungsplanung festgelegt. Die Mengen der Prozessschritte  $S$  sowie der Arbeitszeiten  $T$  sind wie folgt definiert, wobei  $I_S$  die Indexmenge beider Mengen darstellt:

$$S := \{s_i \mid s_i \text{ ist } i\text{-ter Prozessschritt, } i \in I_S\}$$

$$T := \{t_i \mid t_i \text{ ist die Arbeitszeit des Prozessschritts } s_i, i \in I_S\}$$

Aus der Sicht eines Fertigungsprozesses muss zwischen Brutto- und Netto-Input-Ressourcenströmen, Brutto- und Netto-Output-Ressourcenströmen sowie Input- und Output-Reuse-Ressourcenströmen unterschieden werden (vgl. Abbildung 22). Die Brutto-Ressourcenströme eines Prozesses ergeben sich dabei als Summe der Brutto-Ressourcenströme aller seiner Verbraucher. Die *Brutto-Input-Ressourcenströme* setzen sich aus den Ressourcen zusammen, die insgesamt in

den Prozess eingehen. Die Menge der Brutto-Input-Ressourcenströme ist wie folgt definiert:

$$\underline{R}_{\text{in}} := \{r_{\text{in } j} \mid r_{\text{in } j} \text{ ist Brutto-Input-Ressourcenstrom} \\ \text{der } j\text{-ten Ressource, } j \in J\}$$

Die Netto-Input-Ressourcenströme des Prozesses, die den für die gesamte Prozesskette relevanten Input-Ressourcenströmen entsprechen, umfassen von den Brutto-Input-Ressourcen den Anteil an Ressourcen, die prozesskettenübergreifend neu aufgewendet werden, d. h. wiederverwendete Output-Ressourcen desselben Prozesses oder anderer Prozesse innerhalb der Prozesskette werden hierbei nicht berücksichtigt (vgl. Abbildung 19). Entsprechend verhält es sich mit den Brutto- und Netto-Output-Ressourcenströmen. *Brutto-Output-Ressourcenströme* sind die Ressourcen, die den Prozess verlassen und nicht in das Produkt eingehen. Die Menge der Brutto-Output-Ressourcenströme wird wie folgt festgelegt:

$$\underline{R}_{\text{out}} := \{r_{\text{out } j} \mid r_{\text{out } j} \text{ ist Brutto-Output-Ressourcenstrom} \\ \text{der } j\text{-ten Ressource, } j \in J\}$$

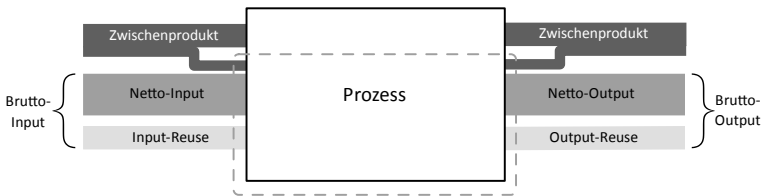


Abbildung 22: Ressourcenströme eines Fertigungsprozesses

Die Netto-Output-Ressourcenströme, die mit den Output-Ressourcenströmen der Prozesskette übereinstimmen, setzen sich aus den Ressourcen zusammen, die nicht in das Produkt eingehen und weder demselben noch einem anderen Prozess der Fertigungsprozesskette als wiederverwendeter Input dienen. *Input- und Output-Reuse-Ressourcenströme* sind entweder Input-Ressourcen des betrachteten Prozesses, die wiederverwendete Output-Ressourcen eines Prozesses der Kette waren oder Output-Ressourcen des betrachteten Prozess, die wiederverwendete Input-Ressourcen eines Prozesses der Kette werden. Die Mengen der Input- und Output-Reuse-Ressourcenströme werden definiert als:

$$\tilde{R}_{\text{in}} := \{\tilde{r}_{\text{in } j} \mid \tilde{r}_{\text{in } j} \text{ ist Input-Reuse-Ressourcenstrom} \\ \text{der } j\text{-ten Ressource, } j \in J\}$$

$$\tilde{R}_{\text{out}} := \left\{ \tilde{r}_{\text{out } j} \mid \tilde{r}_{\text{out } j} \text{ ist Output-Reuse-Ressourcenstrom} \right. \\ \left. \text{der } j\text{-ten Ressource, } j \in J \right\}$$

Alle beschriebenen Ressourcenströme auf Prozessebene beziehen sich auf die Erstellung genau einer Produkteinheit. Analog zu den eingeführten Ressourcenströmen lassen sich auch die entsprechenden Ressourcenflüsse definieren. Wie bereits bei den Verbrauchern (vgl. Abschnitt 4.2.2.2) können auch bei einem Prozess Teile der Brutto-Input-Ressourcenströme diesen in Form des Zwischenprodukts verlassen bzw. eingehende Zwischenprodukt-Ressourcenströme können zu Brutto-Output-Ressourcenströmen werden. Abermals sind die Zwischenprodukt-Ressourcenströme für die Bestimmung der Ressourceneffizienz nicht von Relevanz und werden daher im Modell eines Prozesses nicht aufgeführt.

Die Prozessschritte, Arbeitszeiten, Ressourcenströme und Ressourcenflüsse bilden das Mengensystem der Attribute des Prozesses. Um die Übersichtlichkeit der formalen Prozessdefinition zu wahren, werden sowohl die Mengenfamilie der Ressourcenflüsse  $\mathfrak{R}'$  als auch die Mengenfamilie der Ressourcenströme  $\mathfrak{R}$  eines Prozesses jeweils zusammengefasst:

$$\mathfrak{R}'_i = \left\{ \left\{ r'_{\text{in}} \in R'_{\text{in}} \mid r'_{\text{in}} \text{ ist Netto-Input-Ressourcenfluss des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\ \left. \left\{ r'_{\text{out}} \in R'_{\text{out}} \mid r'_{\text{out}} \text{ ist Netto-Output-Ressourcenfluss des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \underline{r}'_{\text{in}} \in \underline{R}'_{\text{in}} \mid \underline{r}'_{\text{in}} \text{ ist Brutto-Input-Ressourcenfluss des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \underline{r}'_{\text{out}} \in \underline{R}'_{\text{out}} \mid \underline{r}'_{\text{out}} \text{ ist Brutto-Output-Ressourcenfluss des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \tilde{r}'_{\text{in}} \in \tilde{R}'_{\text{in}} \mid \tilde{r}'_{\text{in}} \text{ ist Input-Reuse-Ressourcenfluss des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \tilde{r}'_{\text{out}} \in \tilde{R}'_{\text{out}} \mid \tilde{r}'_{\text{out}} \text{ ist Output-Reuse-Ressourcenfluss des Prozesses } p_i \right\} \right\}$$

$$\mathfrak{R}_i = \left\{ \left\{ r_{\text{in}} \in R_{\text{in}} \mid r_{\text{in}} \text{ ist Netto-Input-Ressourcenstrom des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\ \left. \left\{ r_{\text{out}} \in R_{\text{out}} \mid r_{\text{out}} \text{ ist Netto-Output-Ressourcenstrom des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \underline{r}_{\text{in}} \in \underline{R}_{\text{in}} \mid \underline{r}_{\text{in}} \text{ ist Brutto-Input-Ressourcenstrom des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \underline{r}_{\text{out}} \in \underline{R}_{\text{out}} \mid \underline{r}_{\text{out}} \text{ ist Brutto-Output-Ressourcenstrom des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \tilde{r}_{\text{in}} \in \tilde{R}_{\text{in}} \mid \tilde{r}_{\text{in}} \text{ ist Input-Reuse-Ressourcenstrom des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\ \left. \left\{ \tilde{r}_{\text{out}} \in \tilde{R}_{\text{out}} \mid \tilde{r}_{\text{out}} \text{ ist Output-Reuse-Ressourcenstrom des Prozesses } p_i \right\} \right\}$$

Ein Fertigungsprozess führt eine Technologie  $v \in V$  zur Erzeugung von Produktfeatures  $f \in F$  aus und nimmt dabei Verbraucher  $b \in B$  in Anspruch. Technologien, Features und Verbraucher sind daher Systemelemente eines Pro-

zesses (vgl. Abbildung 20). Es existieren außerdem mehrere Abhängigkeiten sowohl zwischen den Attributen des Systems untereinander als auch zwischen den Attributen des Systems und denen der Systemelemente.

Der jeweilige Prozessschritt bestimmt den Zustand eines jeden genutzten Verbrauchers während der entsprechenden Arbeitszeit. Die Brutto-Ressourcenflüsse eines Prozesses stimmen über die Abbildung der Prozessschritte auf die Verbraucher-Zustände mit den Ressourcenflüssen der Verbraucher überein. Damit lassen sich die Brutto-Input-Ressourcenströme für jeden Prozessschritt als Produkt der Brutto-Input-Ressourcenflüsse und der entsprechenden Arbeitszeit berechnen<sup>18</sup>. Analog lassen sich auch die Brutto-Output-Ressourcenströme bestimmen. Zudem wird der Input- und Output-Reuse-Ressourcenfluss vom jeweiligen Prozessschritt festgelegt. Wird der Reuse-Ressourcenfluss mit der entsprechenden Arbeitszeit multipliziert, so ergeben sich die Reuse-Ressourcenströme. Die Netto-Ressourcenströme ergeben sich aus den Reuse- und Brutto-Ressourcenströmen. Ein Prozess hat i. d. R. keine Subsysteme. Somit wird ein Fertigungsprozess  $p_i$  wie folgt definiert:

$$\begin{aligned}
 p_i &= (\mathfrak{A}_i, \mathfrak{U}_i, \mathfrak{F}_i, \mathfrak{S}_i), \text{ wobei} \\
 \mathfrak{A}_i &= \left\{ \left\{ s \in S \mid s \text{ ist Prozessschritt des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\
 &\quad \left. \left\{ t \in T \mid t \text{ ist Arbeitszeit des Prozessschritts } s \right\}, \mathfrak{R}'_i, \mathfrak{R} \right\} \\
 \mathfrak{U}_i &= \left\{ \left\{ v \in V \mid v \text{ ist angewandte Technologie des Prozesses } p_i \right\}, \right. \\
 &\quad \left\{ f \in F \mid f \text{ ist erzeugtes Feature des Prozesses } p_i \right\}, \\
 &\quad \left. \left\{ b \in B \mid b \text{ ist genutzter Verbraucher des Prozesses } p_i \right\} \right\} \quad (4.3) \\
 \mathfrak{F}_i &= \left\{ \nu : S \rightarrow Z, s \mapsto z := \nu(s), \text{ für alle genutzten} \right. \\
 &\quad \text{Verbraucher } b \text{ des Prozesses } p_i, \\
 &\quad \tilde{\mathbf{f}}_{\text{in}} : S \rightarrow \tilde{R}'_{\text{in}}, s \mapsto \tilde{\mathbf{r}}'_{\text{in}} := \tilde{\mathbf{f}}_{\text{in}}(s), \\
 &\quad \tilde{\mathbf{f}}_{\text{out}} : S \rightarrow \tilde{R}'_{\text{out}}, s \mapsto \tilde{\mathbf{r}}'_{\text{out}} := \tilde{\mathbf{f}}_{\text{out}}(s), \\
 &\quad \underline{\mathbf{f}}_{\text{in}} : S \rightarrow \underline{R}'_{\text{in}}, s \mapsto \underline{\mathbf{r}}'_{\text{in}} := \underline{\mathbf{f}}_{\text{in}}(s), \\
 &\quad \underline{\mathbf{f}}_{\text{out}} : S \rightarrow \underline{R}'_{\text{out}}, s \mapsto \underline{\mathbf{r}}'_{\text{out}} := \underline{\mathbf{f}}_{\text{out}}(s),
 \end{aligned}$$

---

<sup>18</sup> Zur Ermittlung der energetischen Input-Ressourcenströme der Wirkenergiequelle während der Hauptzeit können häufig die Parameter der ausgeführten Technologie herangezogen werden. Ist dies der Fall, so kann zusätzlich eine Abbildung der Technologieparameter auf die Input-Ressourcenströme definiert werden.

$$\begin{aligned}
 \tilde{\varphi}_{\text{in}} &: T \times \tilde{R}_{\text{in}}^m \rightarrow \tilde{R}_{\text{in}}^n, (t, \tilde{\mathbf{r}}'_{\text{in}}) \mapsto \tilde{\mathbf{r}}_{\text{in}} := \tilde{\varphi}_{\text{in}}(t, \tilde{\mathbf{r}}'_{\text{in}}), \\
 \tilde{\varphi}_{\text{out}} &: T \times \tilde{R}_{\text{out}}^m \rightarrow \tilde{R}_{\text{out}}^n, (t, \tilde{\mathbf{r}}'_{\text{out}}) \mapsto \tilde{\mathbf{r}}_{\text{out}} := \tilde{\varphi}_{\text{out}}(t, \tilde{\mathbf{r}}'_{\text{out}}), \\
 \underline{\varphi}_{\text{in}} &: T \times \underline{R}_{\text{in}}^m \rightarrow \underline{R}_{\text{in}}^n, (t, \underline{\mathbf{r}}'_{\text{in}}) \mapsto \underline{\mathbf{r}}_{\text{in}} := \underline{\varphi}_{\text{in}}(t, \underline{\mathbf{r}}'_{\text{in}}), \\
 \underline{\varphi}_{\text{out}} &: T \times \underline{R}_{\text{out}}^m \rightarrow \underline{R}_{\text{out}}^n, (t, \underline{\mathbf{r}}'_{\text{out}}) \mapsto \underline{\mathbf{r}}_{\text{out}} := \underline{\varphi}_{\text{out}}(t, \underline{\mathbf{r}}'_{\text{out}}), \\
 \varphi_{\text{in}} &: \underline{R}_{\text{in}}^n \times \tilde{R}_{\text{in}}^n \rightarrow R_{\text{in}}^n, (\underline{\mathbf{r}}_{\text{in}}, \tilde{\mathbf{r}}_{\text{in}}) \mapsto \mathbf{r}_{\text{in}} := \varphi_{\text{in}}(\underline{\mathbf{r}}_{\text{in}}, \tilde{\mathbf{r}}_{\text{in}}) \\
 &= \underline{\mathbf{r}}_{\text{in}} - \tilde{\mathbf{r}}_{\text{in}}, \\
 \varphi_{\text{out}} &: \underline{R}_{\text{out}}^m \times \tilde{R}_{\text{out}}^m \rightarrow R_{\text{out}}^m, (\underline{\mathbf{r}}_{\text{out}}, \tilde{\mathbf{r}}_{\text{out}}) \\
 &\mapsto \mathbf{r}_{\text{out}} := \varphi_{\text{out}}(\underline{\mathbf{r}}_{\text{out}}, \tilde{\mathbf{r}}_{\text{out}}) = \underline{\mathbf{r}}_{\text{out}} - \tilde{\mathbf{r}}_{\text{out}} \} \\
 \mathfrak{S}_i &= \emptyset
 \end{aligned}$$

Ähnlich wie bei den in Abschnitt 4.2.2.2 eingeführten Ressourcenfluss-Zustands-Matrizen der Verbraucher können für einen Prozess zu jedem Prozessschritt  $i$  ein Brutto-Input- und ein Brutto-Output-Ressourcenfluss-Vektor definiert werden:

$$\underline{\mathbf{r}}'_{\text{in } i} := \underline{\mathbf{f}}_{\text{in}}(s_i) = \begin{pmatrix} r'_{\text{in } 1i} \\ \vdots \\ r'_{\text{in } ni} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

$$\underline{\mathbf{r}}'_{\text{out } i} := \underline{\mathbf{f}}_{\text{out}}(s_i) = \begin{pmatrix} r'_{\text{out } 1i} \\ \vdots \\ r'_{\text{out } mi} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Ist außerdem  $k$  die Anzahl aller Prozessschritte des Prozesses  $p_i$ , so lassen sich die Ressourcenflüsse in einer Ressourcenfluss-Prozessschritt-Matrix sowohl für die Brutto-Input-Ressourcen  $\underline{\mathbf{R}}'_{\text{in}} \in \underline{R}_{\text{in}}^{n \times k}$  als auch für die Brutto-Output-Ressourcen  $\underline{\mathbf{R}}'_{\text{out}} \in \underline{R}_{\text{out}}^{m \times k}$  wie folgt definieren:

$$\underline{\mathbf{R}}'_{\text{in}} := (\underline{\mathbf{r}}'_{\text{in } 1}, \dots, \underline{\mathbf{r}}'_{\text{in } k}) = \begin{pmatrix} r'_{\text{in } 11} & \cdots & r'_{\text{in } 1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{\text{in } n1} & \cdots & r'_{\text{in } nk} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

$$\underline{\mathbf{R}}'_{\text{out}} := (\underline{\mathbf{r}}'_{\text{out } 1}, \dots, \underline{\mathbf{r}}'_{\text{out } k}) = \begin{pmatrix} r'_{\text{out } 11} & \cdots & r'_{\text{out } 1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{\text{out } m1} & \cdots & r'_{\text{out } mk} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Außerdem lassen sich die Brutto-Input-  $\underline{\mathbf{r}}_{\text{in}}$  und Brutto-Output-Ressourcenstrom-Vektoren  $\underline{\mathbf{r}}_{\text{out}}$  durch Multiplikation der jeweiligen

Ressourcenfluss-Prozessschritt-Matrix (4.6) bzw. (4.7) mit den Arbeitszeiten berechnen:

$$\underline{r}_{\text{in}} := \underline{R}'_{\text{in}} \cdot \begin{pmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{\text{in } 1} \\ \vdots \\ r_{\text{in } n} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

$$\underline{r}_{\text{out}} := \underline{R}'_{\text{out}} \cdot \begin{pmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{\text{out } 1} \\ \vdots \\ r_{\text{out } m} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Die Definition der Input-Reuse- und Output-Reuse-Ressourcenfluss-Prozessschritt-Matrix,  $\tilde{R}'_{\text{in}}$  und  $\tilde{R}'_{\text{out}}$ , sowie der Input-Reuse- und Output-Reuse-Ressourcenstrom-Vektoren,  $\tilde{r}_{\text{in}}$  und  $\tilde{r}_{\text{out}}$ , erfolgt analog. Die Netto-Ressourcenstrom-Vektoren lassen sich gemäß des in Gleichung (4.3) angegebenen funktionalen Zusammenhangs bestimmen.

**Prozessketten.** Jede Prozesskette  $k_i$  hat einen oder mehrere Prozesse als Subsysteme. Damit entsprechen die Systemelemente einer Prozesskette der Summe aller Systemelemente der Prozesse, die zu der betreffenden Prozesskette gehören. Die Menge der Fertigungsprozessketten  $K$  wird mit der Indexmenge  $I_K$  wie folgt definiert:

$$K := \{k_i \mid k_i \text{ ist } i\text{-te Fertigungsprozesskette, } i \in I_K\}$$

Die direkten Ressourcenströme einer Fertigungsprozesskette wurden bereits in Abschnitt 3.3.1 eingeführt. Diese Ressourcenströme stellen das Mengensystem der Attribute einer Prozesskette dar. Die Input- und Output-Ressourcenströme der Prozesskette stimmen mit der Summe der Netto-Input- und Netto-Output-Ressourcenströme über alle Prozesse überein. Die energetischen Produkt-Ressourcenströme ergeben sich aus den in der Prozesskette erzeugten Features und die materiellen Produkt-Ressourcenströme stimmen mit den Ressourcen, aus denen das Produkt optimalerweise besteht, überein. Eine Fertigungsprozesskette  $k_i$  wird formal wie folgt beschrieben:

$k_i = (\mathfrak{A}_i, \mathfrak{U}_i, \mathfrak{F}_i, \mathfrak{S}_i)$ , wobei

$$\mathfrak{A}_i = \left\{ \begin{aligned} &\{r_{\text{in}} \in R_{\text{in}} \mid r_{\text{in}} \text{ ist Input-Ressourcenstrom von } k_i\}, \\ &\{r_{\text{out}} \in R_{\text{out}} \mid r_{\text{out}} \text{ ist Output-Ressourcenstrom von } k_i\}, \\ &\{r_{\text{pro}} \in R_{\text{pro}} \mid r_{\text{pro}} \text{ ist Produkt-Ressourcenstrom von } k_i\} \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$



$$\begin{aligned} \mathfrak{U}_i &= \left\{ \left\{ v \in V \mid v \text{ ist angewandte Technologie von } k_i \right\}, \right. \\ &\quad \left\{ f \in F \mid f \text{ ist erzeugtes Produktfeature von } k_i \right\}, \\ &\quad \left. \left\{ b \in B \mid b \text{ ist genutzer Verbraucher von } k_i \right\} \right\} \\ \mathfrak{F}_i &= \emptyset \\ \mathfrak{S}_i &= \left\{ p \in P \mid p \text{ ist Prozess von } k_i \right\} \end{aligned}$$

## 4.3 Modell zur Quantifizierung von Ressourcenströmen

### 4.3.1 Grundlagen der Modellierung

Nachdem eine Beschreibung der relevanten Systeme und deren Systemelemente sowie der dazugehörigen Ressourcenströme vorliegt, wird nun die Quantifizierung der Ressourcenströme behandelt. Das Vorgehen zur quantitativen Bestimmung der Ressourcenströme wird mithilfe von Diagrammen dargestellt.

Bereits seit dem Jahr 1996 integriert, kanonisiert und standardisiert die Object Management Group (OMG) unter dem Namen Unified Modelling Language (UML) verschiedene Modellierungsansätze. Die Version 2.0 der UML wurde 2005 nach einer gründlichen Überarbeitung herausgegeben. Unter anderem werden Vorschriften für die Erstellung von Aktivitätsdiagrammen als UML 2.0 Diagramm-Typ zur Verfügung gestellt, welche in dieser Arbeit zur Anwendung kommen.

Das klassische Einsatzgebiet der Aktivitätsdiagramme ist die Dokumentation und Modellierung von geschäftlichen Prozessen oder konkreten algorithmischen Abläufen. Durch die Erweiterungen in UML 2.0 sind im Vergleich zu dessen Vorgänger neue Anwendungsgebiete hinzugekommen, wie etwa die Abbildung von Datenströmen. Ein Aktivitätsdiagramm kann aus verschiedenen graphischen Elementen zusammengesetzt werden. Eine Aktivität besteht i. d. R. aus einem Anfangszustand, einer Aktion und einem Endzustand. Die drei graphischen Elemente sind in der vorgegebenen Reihenfolge durch Kontrollfluss-Pfeile miteinander verbunden. Zudem existieren sogenannte Pins, welche Anfangs- und Endzustände der Aktivitäten ersetzen können (RUPP ET AL. 2007), wie dies auch in Abbildung 23 der Fall ist. Die Kontrollflüsse, welche an Pins starten und enden, werden als Datenflüsse bezeichnet. Im Gegensatz zu den Kontrollflüssen können mehrere Datenflüsse als Eingänge einer Aktion dienen. Insgesamt wird durch die Pins der Fokus der Darstellung von der Abfolge auf den Zusammenhang der einzelnen Aktionen gelegt. In Zusammenhang mit Datenflüssen ist es sinnvoll, dass eine Aktion mehrfach Daten an eine nachfolgende Aktion sendet, bevor diese alle Informationen verarbeitet. Um dies darstellen zu können, existieren in UML Multiplizitäten, welche an Datenflüssen

angebracht werden können. So hat Aktion 3 in der Abbildung entweder „n“-mal Aktion 1 als Eingang oder einmal Aktion 2. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf existierende Multiplizitäten allgemein mit der Angabe von „n“ hingewiesen, dies impliziert jedoch keinesfalls, dass dieselbe Anzahl an Datensendungen bzw. Vorgängern vorliegt. Außerdem wurde die Angabe der Multiplizität auf dem Datenfluss platziert, was von den Konventionen in UML 2.0 abweicht. Dies ist jedoch notwendig, um gleichzeitig eine Bezeichnung des Datenflusses anzugeben. Das neu platzierte „n“ bedeutet im Rahmen der vorliegenden Arbeit immer, dass ein Nachfolger mehrere Vorgänger hat.

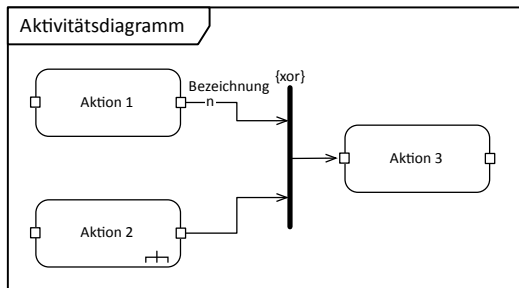


Abbildung 23: Graphische Elemente der UML 2.0-Darstellung von Aktivitätsdiagrammen

Jedes UML-Diagramm kann in einen Rahmen gesetzt werden, welcher eine bessere Einordnung in das Gesamtmodell ermöglicht (RUPP ET AL. 2007). Meistens werden für eine Aktivität mehrere Aktionen sequenziell miteinander verknüpft. Damit eine Aktivität nicht durch zu viele Aktionen unübersichtlich wird, gibt es die Möglichkeit Aktionen hierarchisch zusammenzufassen, wie dies in Abbildung 23 dargestellt ist. Beispielsweise besteht Aktion 2 selbst wiederum aus mehreren hierarchisch zusammengefassten Aktionen, was durch ein Symbol in der rechten unteren Ecke der Aktion dargestellt wird. Um einen Ablauf in verschiedene Aktivitätsstränge aufzuteilen oder mehrere Aktivitätsstränge wieder zusammenzuführen, sind Verzweigungs- und Synchronisationsknoten notwendig. Diese Knoten können mit unterschiedlichen Bedingungen, wie etwa „and“, „or“ und „xor“ versehen werden. Im Folgenden werden die Möglichkeiten bei der Angabe von benötigten Daten sowie die Quantifizierung von Ressourcenströmen mithilfe von Aktivitätsdiagrammen modelliert und veranschaulicht.

## 4.3.2 Prozessschritte und Arbeitszeiten

### 4.3.2.1 Kategorisierung

Basis der Berechnung der Ressourcenströme aus den Ressourcenflüssen sind die Arbeitszeiten. In der Fertigung werden die Arbeitszeiten i. d. R. unterschiedlichen Kategorien zugeordnet. Die Definitionen der wichtigsten Zeiten lauten nach REFA (GEITNER 1987, S. 63 ff.):

- *Grundzeit* ist die Sollzeit für die planmäßige Ausführung von Abläufen. Sie bezieht sich auf eine Produkteinheit und setzt sich zusammen aus:
  - *Hauptnutzungszeit* (auch *Hauptzeit*) ist die Zeit, die zur planmäßigen, unmittelbaren Erfüllung der Arbeitsaufgabe benötigt wird. Während der Hauptzeit wird beispielsweise das Werkstück bearbeitet.
  - *Nebennutzungszeit* (auch *Nebenzeit*) ist die Zeit, die nur mittelbar zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe erforderlich ist. Während der Nebenzeit wird z. B. ein neues Werkstück in ein Magazin eingelegt oder das Werkzeug verfahren.
  - *Brachzeit* ist die Zeit, die durch das planmäßige Unterbrechen der Nutzung eines Betriebsmittels bedingt ist.
- *Verteilzeit* ist die Sollzeit, welche zusätzlich zur planmäßigen Ausführung auftritt. Verteilzeiten kommen während des Ablaufs mit unterschiedlicher Dauer und Häufigkeit vor und werden deshalb mit einem Prozentsatz der Grundzeit abgeschätzt. Ein Beispiel für Verteilzeiten sind störungsbedingte Unterbrechungen.
- *Rüstzeit* ist die Vorgabezeit für das Belegen eines Betriebsmittels durch das Rüsten bei einem Auftrag und bezieht sich auf die gesamte Losgröße. Unter Rüsten wird das Vorbereiten des Betriebsmittels auf die Erfüllung der Arbeitsaufgabe verstanden.

Abbildung 24 zeigt die Gliederung der aufgeführten Zeiten für ein Fertigungs-betriebsmittel. Eine weitere Unterteilung der jeweiligen Zeiten ist möglich, für die vorliegende Arbeit allerdings nicht erforderlich.

Da während der oben genannten Zeiten unterschiedliche Ressourcenverbräuche auftreten können, ist eine Anlehnung an die oben beschriebene Unterteilung der Zeiten bzw. Prozessschritte für die Modellierung der Ressourcenströme sinnvoll. Es erfolgt daher eine Aufteilung in Haupt-Prozessschritte, Neben-Prozessschritte, Brach-Prozessschritte und Rüst-Prozessschritte mit ihren jeweiligen Arbeitszeiten. Die Betriebsmittel-Verteilzeiten werden in diesem Modell nicht eigenständig aufgeführt, sondern im Rahmen der Brachzeitermittlung

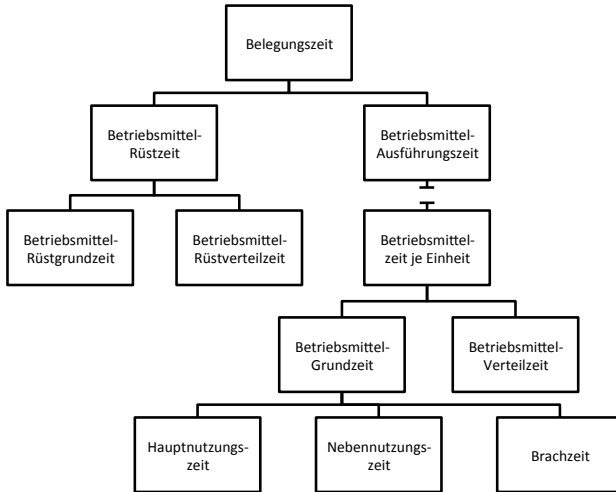


Abbildung 24: Gliederung der Belegungszeit eines Betriebsmittels nach GEITNER (1987, S. 66)

berücksichtigt, da während Verteilzeiten keine Tätigkeiten an den Verbrauchern durchgeführt werden und sie somit als Brachzeiten behandelt werden können. Insbesondere bei der Brachzeit ist häufig eine Unterteilung in mehrere Instanzen der Brachzeit notwendig, da zwischen kurzen und längeren Brachzeiten unterschieden werden muss. Während beispielsweise die Maschine über die Mittagspause hinweg betriebsbereit ist, kann sie über Nacht in einen Stand-by-Zustand versetzt oder ausgeschaltet werden und weist damit unterschiedliche Ressourcenflüsse auf.

Die getroffene Unterscheidung bezüglich der Prozessschritte bzw. der Arbeitszeiten wird durch disjunkte Teilmengen der Indexmenge der Prozessschritte bzw. Arbeitszeiten ( $I_S$ ) wiedergegeben. Die Indexmengen weisen folgende Beziehung auf:

$$I_S = I_{S_H} \cup I_{S_N} \cup I_{S_B} \cup I_{S_R}$$

Dabei ist  $I_{S_H}$  die Indexmenge der Haupt-Prozessschritte und -zeiten,  $I_{S_N}$  die Indexmenge der Neben-Prozessschritte und -zeiten,  $I_{S_B}$  die Indexmenge der Brach-Prozessschritte und -zeiten und  $I_{S_R}$  die Indexmenge der Rüst-Prozessschritte und -zeiten.

### 4.3.2.2 Möglichkeiten zur Zeitermittlung

Es existieren mehrere Möglichkeiten, die Arbeitszeiten zu ermitteln. Die Art der Ermittlung ist insbesondere abhängig von dem Umsetzungsstatus der Prozesskette, d. h. ob die Prozesskette bereits real genutzt wird oder sich noch in der Planung befindet. Einen Überblick über die verschiedenen Methoden zur Ermittlung von Zeitdaten gibt Abbildung 25.

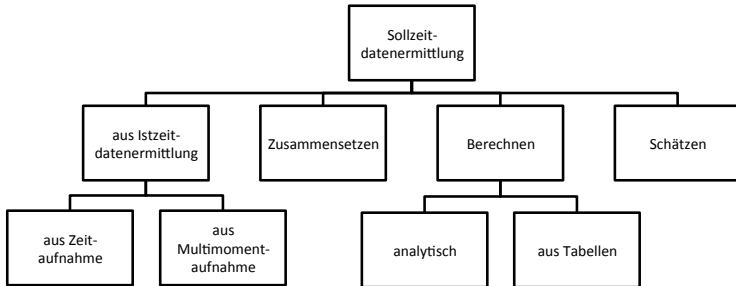


Abbildung 25: Ermittlung von Vorgabezeiten nach REFA (GEITNER 1987, S. 67)

Den beiden Methoden zur Sollzeitdatenermittlung aus Istzeitdaten liegen statistische Auswerteverfahren bei verschiedenen Messverfahren zugrunde. In beiden Fällen sind reale Prozesse für die Messung der Istdaten zwingend erforderlich. Das Zusammensetzen der Sollzeiten kann durch Systeme vorbestimmter Zeiten, wie z. B. das „Methods Time Measurement“ (MTM), erfolgen. Beim MTM-Verfahren wird jede Tätigkeit aus elementaren Bewegungselementen zusammengesetzt, welchen wiederum in Tabellen hinterlegten Zeiten zugeordnet werden können. Dieses System dient vorwiegend der Ermittlung der Tätigkeitszeit von Menschen im Rahmen von Montageaufgaben. Die Berechnung der Prozesszeit erfolgt für die Hauptzeiten mechanisierter und automatisierter Betriebsmittel. So kann bei einer Bearbeitung aus Vorschubgeschwindigkeit und Länge des Bearbeitungswegs die benötigte Hauptzeit ermittelt werden. Bei komplexeren Abhängigkeiten werden die Zeiten nicht analytisch berechnet, sondern mithilfe von Erfahrungswerten aus Tabellen interpoliert. Die letzte Möglichkeit zur Ermittlung der Solldaten ist das Schätzen und Vergleichen. Dabei wird versucht, die Zeit für den zu untersuchenden Vorgang über einen ähnlichen bekannten Vorgang abzuschätzen. Nach GEITNER liegt der Fehler von erfahrenen Mitarbeitern der Fertigungsvorbereitung bei diesem Verfahren meist unter 5 %, wodurch die Wirtschaftlichkeit des Schätzens von den anderen Verfahren kaum übertroffen werden kann (GEITNER 1987, S. 72).

Da es sich bei den meisten Prozessen einer Fertigungsprozesskette um mechanisierte oder automatisierte Verfahren handelt, kommt kein Verfahren zur

Zusammensetzung der Sollzeiten zur Anwendung. Ebenso muss davon ausgegangen werden, dass für die in der Planung befindlichen Prozesse keine Istzeitdatenermittlung durchgeführt werden kann. Für die Ermittlung der Zeiten in der operativen Technologieplanung bleiben somit lediglich die Berechnung sowie die Schätzung übrig. Für jede Arbeitszeit können alternative Ermittlungsmöglichkeiten verwendet werden. Es liegen i. d. R. mehrere Instanzen jeder Arbeitszeitkategorie vor. Für jede dieser Instanzen kann eine andere Angabemöglichkeit gewählt werden, je nachdem welche Daten im Unternehmen bereits vorhanden sind.

Für die Angabe der *Hauptzeiten* sind entweder Schätzungen oder Berechnungen möglich, was in Abbildung 26 dargestellt ist. Mit der direkten Angabe der Hauptzeiten wird in erster Linie die Methode des Schätzens abgedeckt. Für den Fall, dass doch eine Istdatenermittlung oder Zusammensetzung der Sollzeiten möglich ist, können die Ergebnisse dieser Methoden hier angegeben werden. Die zweite vorgesehene Möglichkeit ist die theoretische Berechnung von Hauptzeiten aus der Bearbeitungslänge und der Vorschubgeschwindigkeit, dem Vorgehen der Prozesszeitberechnung entsprechend.

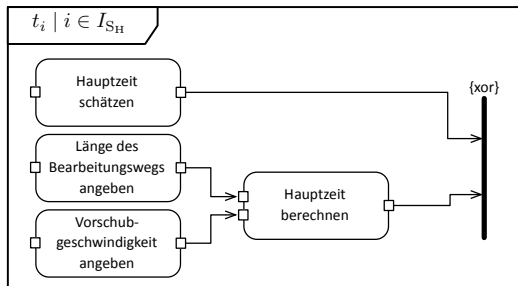


Abbildung 26: Angabemöglichkeiten einer Hauptzeit

Für die *Nebenzeiten* existiert keine allgemeine Berechnungsmöglichkeit, weshalb lediglich eine direkte Angabe für eine Abschätzung sinnvoll ist. Zur Bestimmung der *Brachzeit* in Abbildung 27 existieren mehrere Alternativen. Zum einen ist eine direkte Angabe einer Brachzeit über eine Schätzung möglich. Diese Schätzungen werden vorwiegend für ablaufbedingte Unterbrechungen benötigt, wie etwa das Abkühlen eines Bauteils nach der Bearbeitung. Zum anderen gehören zu den Brachzeiten erholungsbedingte Unterbrechungen des Bedieners wie Mittagspausen und regelmäßig in größeren Zeitabständen auftretende, ablaufbedingte Unterbrechungen wie z. B. Wartungsarbeiten. Diese Brachzeiten können auf die Anzahl der Produkte im jeweiligen Zeitintervall umgelegt werden. Die letzte Berechnungsalternative berücksichtigt die Verteilzeit.

Die Verteilzeit gehört, wie bereits oben erwähnt, im Rahmen der Modellierung der Ressourcenströme zu den Brachzeiten, da die Verbraucher während dieser Zeit keine Aufgabe ausführen, sondern sich in einem Stand-by-ähnlichen Zustand befinden. Die Berechnung basiert auf einem i. d. R. geschätzten Verteilzeitfaktor und der Betriebsmittel-Grundzeit, deren Berechnung in Abbildung 29 dargestellt ist.

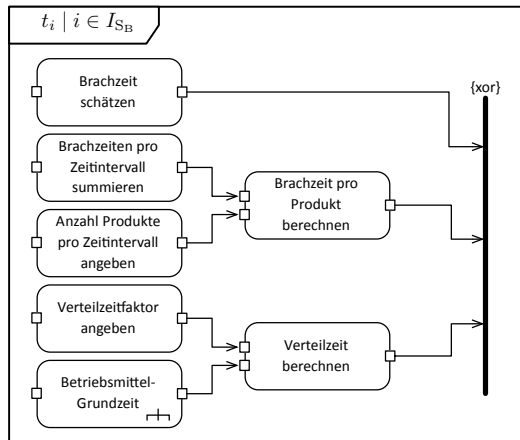


Abbildung 27: Angabemöglichkeiten einer Brachzeit

Nach REFA (1978, S. 53) wird die Betriebsmittel-Rüstzeit stets auf die zu fertigende Losgröße bezogen. Für die Berechnung der Ressourcenströme wird die Rüstzeit für ein einzelnes Produkt ermittelt, damit die resultierenden Ressourcenströme sich grundsätzlich auf die Bearbeitung eines Produkts beziehen. In Abbildung 28 wird zur Kalkulation der Rüstzeit pro Stück die Betriebsmittel-Rüstzeit durch die Losgröße geteilt.

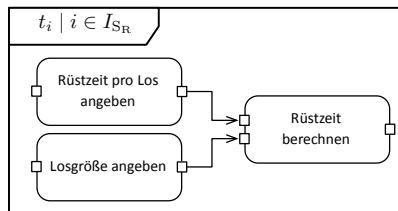


Abbildung 28: Berechnung einer Rüstzeit

Die Berechnung der Betriebsmittel-*Grundzeit*, wie sie zur Berechnung der Betriebsmittel-Verteilzeit benötigt wird, ist in Abbildung 29 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Verteilzeit selbst folglich nicht in der Betriebsmittel-Grundzeit enthalten ist.

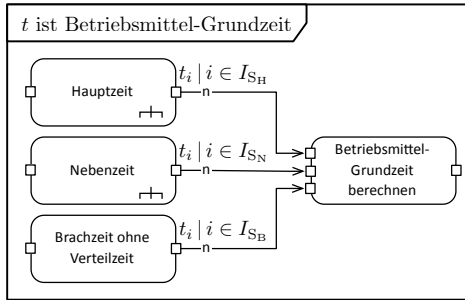


Abbildung 29: Berechnung der Grundzeit

Abbildung 30 zeigt das Modell zur Berechnung der *Betriebsmittelzeit je Produkt*. Anders als in der Gliederung der Zeiten nach GEITNER (1987) in Abbildung 24 beinhaltet das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Modell der Betriebsmittelzeit zusätzlich die Rüstzeit pro Produkt. Zudem werden Verteilzeiten im Rahmen der Brachzeiten berücksichtigt.

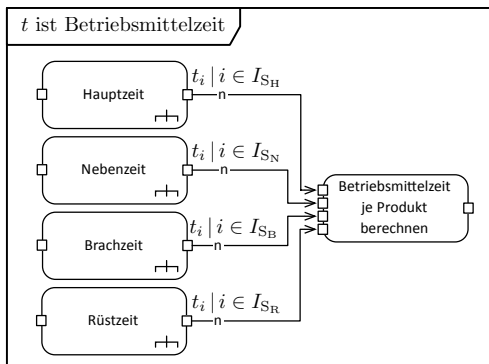


Abbildung 30: Berechnung der Betriebsmittelzeit je Produkt



### 4.3.3 Modellierung der Brutto-Ressourcenströme

#### 4.3.3.1 Energetische Brutto-Input-Ressourcenströme

Ein Brutto-Ressourcenstrom ( $r_j$ ) einer energetischen Ressource ( $j \in J_E$ ) wird bezogen auf ein Stück des bearbeiteten Produkts und einen bestimmten Prozess angegeben. Dies dient der Übersichtlichkeit und dem einheitlichen Verständnis bei der Quantifizierung der Ressourcenströme.

Für die Quantifizierung der Brutto-Ressourcenströme können bei komplexen Fertigungsbetriebsmitteln vier grundlegende Kategorien von energetischen Verbrauchern unterschieden werden, was durch eine entsprechende Unterteilung der Indexmenge der Verbraucher ( $I_B$ ) wiedergegeben wird:

- *Wirkenergiequellen* ( $b_i \mid i \in I_{B_W}$ ) sind unmittelbar an der Erzeugung der Produktfeatures beteiligt.
- *Nebenantriebe* ( $b_i \mid i \in I_{B_N}$ ) bewegen das Werkzeug oder Werkstück, sodass eine Bearbeitung an der gewünschten Stelle vorgenommen werden kann.
- *Hilfsaggregate* ( $b_i \mid i \in I_{B_H}$ ) umfassen eine Vielzahl an verschiedenen Verbrauchern, welche einem Betriebsmittel direkt zugeordnet werden können und den Fertigungsprozess unterstützen, wie z. B. die Werkzeugwechseleinheit einer Werkzeugmaschine.
- *Sonstige Verbraucher* ( $b_i \mid i \in I_{B_S}$ ) umfassen alle erforderlichen Verbraucher, welche einem Betriebsmittel nicht direkt zugeordnet werden können, wie z. B. eine Druckluftanlage.

Die disjunkten Indexmengen weisen folgende Beziehung auf:

$$I_B = I_{B_W} \cup I_{B_N} \cup I_{B_H} \cup I_{B_S}$$

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Quantifizierung der *energetischen Brutto-Input-Ressourcenflüsse pro Prozessschritt* ( $r'_{in\ j\ i} \mid j \in J_E$  und  $i \in I_S$ ) für jede Kategorie von Verbraucher angegeben. Auch der Verbrauch indirekt energetischer Brutto-Ressourcen ( $j \in J_E \cap J_M$ ) wird mit dem für die Flussgröße der elektrischen Energie typischen Begriff der Leistung  $P$  in der Einheit Watt ( $[P] = W = J s^{-1}$ ) angegeben, da diese Ressourcenflüsse mithilfe ihres Heizwerts  $H_u$  und ihrer Verbrauchsrate in die geforderte Einheit Watt überführt werden können. Die indirekt energetischen Ressourcen stellen jedoch eigene Ressourcenflüsse dar und werden erst im Rahmen der Bestimmung der Energieeffizienz mit den direkt energetischen Ressourcen verrechnet.

Für *Wirkenergiequellen* ( $b_i \mid i \in I_{B_W}$ ) lassen sich die Leistungsaufnahmen, wie in Abbildung 31 dargestellt, bestimmen. Insgesamt gibt es vier mögliche Vorgehensweisen zur Ermittlung der Leistung einer Wirkenergiequelle.

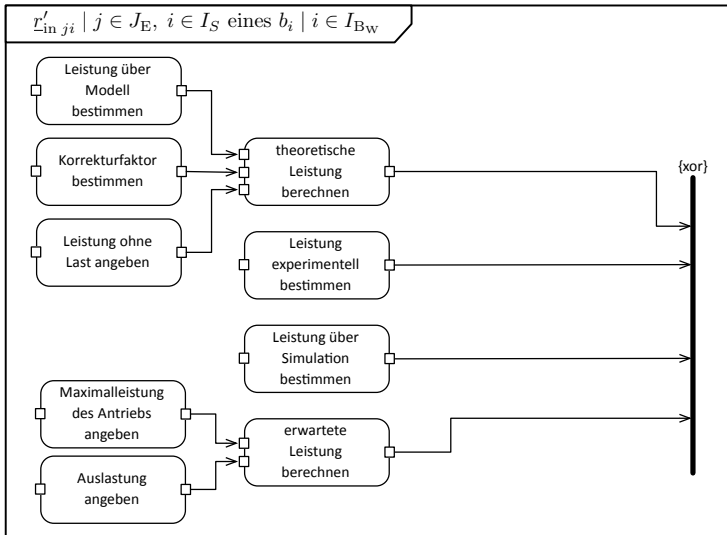


Abbildung 31: Angabemöglichkeiten für energetische Brutto-Input-Ressourcenflüsse von Wirkenergiequellen

Die *erste Möglichkeit* ist eine theoretische Berechnung. Hierzu wird die theoretisch notwendige Leistung der Wirkenergiequelle über analytische oder empirische Modelle der jeweiligen Technologie ( $v_i \mid i \in I_V$ ), wie z. B. das Zerspankraftmodell nach KIENZLE & VICTOR (1952), bestimmt. Da bei empirischen Modellen die Zusammenhänge basierend auf experimentellen Untersuchungen abgeleitet wurden, enthalten diese neben den eigentlichen Wirkleistungen auch anteilig Verluste der Wirkenergiequellen. Um diese zu kompensieren, muss ein betriebsmittelspezifischer Korrekturfaktor ermittelt werden, der eine Berechnung der reinen Wirkleistung ermöglicht. Zusätzlich muss die Leistungsaufnahme der betrachteten Wirkenergiequelle ohne Last zu der berechneten Wirkleistung addiert werden. Diese Leistung ohne Last entspricht beispielsweise den Reibungsverlusten bei Hauptantrieben oder thermischen Verlusten bei Öfen. Die *zweite Möglichkeit* zur Ermittlung der Wirkenergiequellen-Leistungsaufnahme sind Experimente. Da sowohl für den Korrekturfaktor bei der theoretischen Leistung als auch bei der experimentellen Bestimmung zumindest eine Referenzmaschine für initiale Messungen zu Verfügung stehen muss, wird eine *dritte*

*Möglichkeit* zur Ermittlung der Wirkenergiequellen-Leistungsaufnahme vorgesehen. Existiert ein detailliertes Simulationsmodell<sup>19</sup> des Verbrauchers, so kann die Leistung über dieses bestimmt werden. Teilweise wird in der Simulation die benötigte Energie gesamthaft berechnet. Liegt dieser Fall vor, so können die Angaben durch die Division der Energie mit der entsprechenden Arbeitszeit auch in dem vorliegenden Modell verwendet werden. Die *vierte Möglichkeit* erfordert eine Abschätzung durch den Anwender. Hierfür werden einerseits die maximale Leistung der Wirkenergiequelle aus den Betriebsmitteldaten und andererseits eine geschätzte Auslastung benötigt. In Zuständen, während denen die Wirkenergiequelle ohne Last arbeitet, können geringe Prozentsätze der Maximalleistung als Verbrauch angenommen werden.

Für die Gruppe der *Nebenantriebe* und *Hilfsaggregate* ( $b_i \mid i \in I_{B_N} \cup I_{B_H}$ ) existiert keine Möglichkeit zur theoretischen Herleitung der Leistungsaufnahmen. Die verbleibenden Alternativen sind die experimentelle Messung, die Simulation und die Abschätzung der Verbräuche, wie in Abbildung 32 dargestellt.

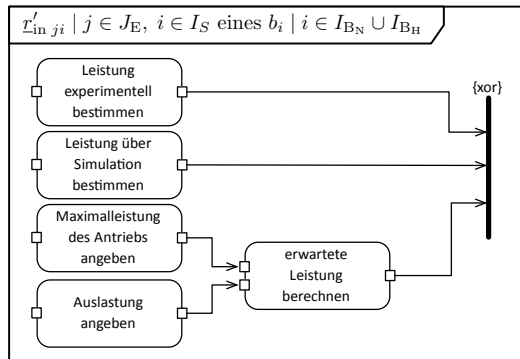


Abbildung 32: Angabemöglichkeiten für energetische Brutto-Input-Ressourcenflüsse von Nebenantrieben und Hilfsaggregaten

Weitere Leistungsaufnahmen verursachen die *sonstigen Verbraucher* ( $b_i \mid i \in I_{B_S}$ ), welche dem genutzten Betriebsmittel nicht direkt zugeordnet werden können. Dies ist der Fall, wenn die Verbraucher für den Betrieb mehrerer Anlagen und Prozesse benötigt werden und der Leistungsbedarf anteilig verteilt werden muss. Das Modell für die energetischen Brutto-Ressourcenflüsse der sonstigen Verbraucher ist in Abbildung 33 gezeigt. Die Bestimmung des

<sup>19</sup> Auch bei der Erstellung eines Simulationsmodells muss i. d. R. zumindest initial eine Referenz-Maschine zur Verfügung stehen, anhand derer das Modell validiert werden kann.

Gesamtverbrauchs kann ebenfalls über Versuche, Simulation oder mithilfe einer Abschätzung erfolgen. Anschließend wird dieser Verbrauch mit dem prozentualen Anteil des Verbrauchs des betrachteten Prozesses zum jeweiligen Prozessschritt multipliziert. Diese Verbraucher, wie etwa die Beleuchtung oder die Klimatisierung, sind i. d. R. unabhängig vom jeweiligen Prozessschritt.

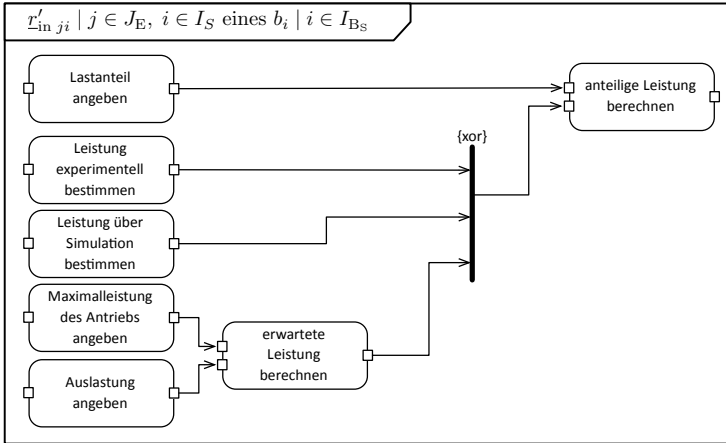


Abbildung 33: Angabemöglichkeiten für energetische Brutto-Input-Ressourcenflüsse von sonstigen Verbrauchern

Zentrale *Druckluftanlagen* als sonstige Verbraucher sind in der Fertigung von besonderer Bedeutung. Da die Druckluftaggregate während der Prozessplanung möglicherweise nicht vorhanden sind, wird eine näherungsweise Berechnung in einem eigenen Modell implementiert. Das zugehörige Vorgehen zeigt Abbildung 34. Über den benötigten Druck in der Einheit Bar ( $[Druck] = \text{bar}$ ) kann der spezifische Leistungsbedarf ermittelt werden (FRAUNHOFER 2002). Dieser wird mit dem benötigten Volumenstrom<sup>20</sup> ( $[\text{Volumenstrom}] = \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) zuzüglich der Leckageverluste multipliziert und ergibt den gesamten Leistungsbedarf. In den Veröffentlichungen der Initiative „Druckluft effizient“ wird der Verlust durch Leckagen auf Werte zwischen 15 und 40% beziffert (FRAUNHOFER 2002). Bei neuen Anlagen kann ein geringer Leckageverlust angenommen werden, während bei älteren, gewachsenen Systemen von einem hohen Verlust ausgegangen werden muss.

<sup>20</sup> Der i. d. R. verwendete Begriff „Volumenstrom“ weicht von den im Rahmen dieser Arbeit definierten Begrifflichkeiten ab (vgl. Abschnitt 3.3.1). Gemäß der hier verwendeten Konventionen wäre die korrekte Bezeichnung Volumenfluss.

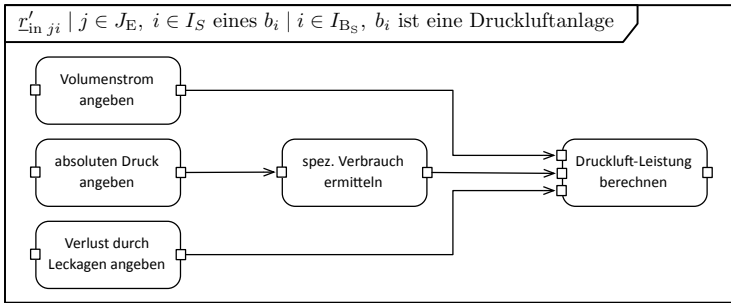


Abbildung 34: Quantifizierung des energetischen Brutto-Input-Ressourcenflusses für Druckluftanlagen

Abbildung 35 fasst die Berechnung der energetischen Brutto-Input-Ressourcenströme pro Produkt und Prozess zusammen.

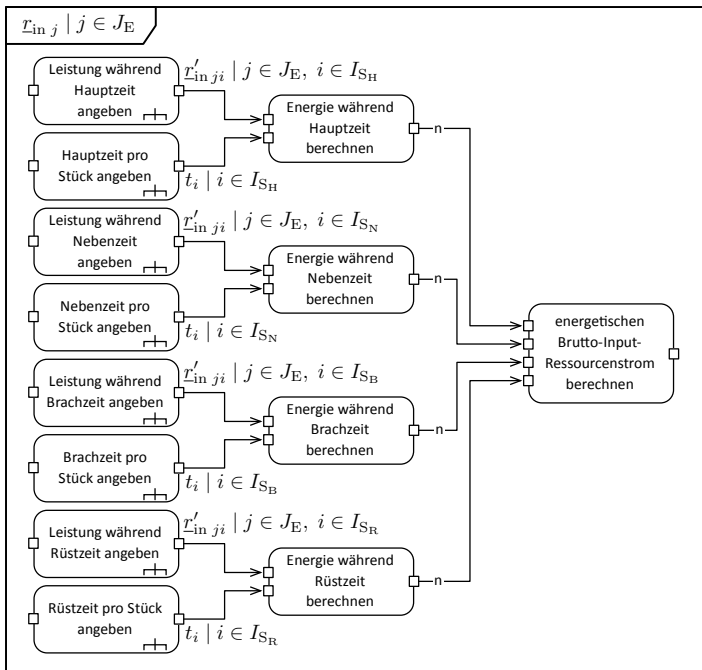


Abbildung 35: Quantifizierung von energetischen Brutto-Input-Ressourcenströmen

Die *energetischen Brutto-Input-Ressourcenströme pro Produkt und Prozess* ( $r_{\text{in } j} \mid j \in J_E$ ) setzen sich aus der Leistungsaufnahme aller Verbraucher<sup>21</sup> ( $b_i \mid i \in I_B$ ) während der Prozessschritte und den entsprechenden Arbeitszeiten ( $t_i \mid i \in I_S$ ) eines Prozesses ( $p_i \mid i \in I_P$ ) zusammen. Für die Berechnung der Ressourcenströme werden demnach die Ressourcenflüsse jedes Verbrauchers für alle Prozessschritte sowie alle Arbeitszeiten benötigt. Da dies eine große Anzahl an benötigten Angaben ergibt, wird die Darstellung des Modells in Abbildung 35 zur Komplexitätsreduktion in mehrere Ebenen unterteilt. Durch die Ausrichtung des Modells an der prozessplanerischen Sicht wird primär nach den Kategorien der Arbeitszeiten und der Prozessschritte unterschieden. Die beschriebenen Verbraucher-Kategorien werden, wie oben erläutert, vornehmlich zur strukturierten Quantifizierung der Ressourcenflüsse herangezogen.

### 4.3.3.2 Materielle Brutto-Input-Ressourcenströme

Zur Strukturierung der materiellen Ressourcenströme wird eine Kategorisierung des Materials nach dessen Einsatz in der Fertigung vorgenommen. Die Kategorien orientieren sich an der in Abschnitt 1.2.2.1 eingeführten Gliederung der Repetierfaktoren:

- *Werkstoff*-Ressourcenströme ( $r_j \mid j \in J_{M_W}$ ) umfassen die Rohstoffe und Halbzeuge, die die Basis für die Erstellung des Endprodukts bilden.
- *Hilfsstoff*-Ressourcenströme ( $r_j \mid j \in J_{M_H}$ ) bestehen aus den für den Prozess erforderlichen materiellen Ressourcen, welche teilweise in das Produkt eingehen.
- *Betriebsstoff*-Ressourcenströme ( $r_j \mid j \in J_{M_B}$ ) enthalten ebenfalls für den Prozess erforderliche materielle Ressourcen, welche hingegen nicht in das Produkt eingehen.

Die getroffene Unterscheidung der materiellen Ressourcen wird durch Teilmengen der Indexmenge der materiellen Ressourcenströme ( $J_M$ ) wiedergegeben. Die Teilmengen sind explizit nicht disjunkt, da eine Ressource z. B. als Betriebsstoff und als Werkstoff in einem Prozess zur Anwendung kommen kann. Die Indexmengen weisen folgende Beziehung auf:

$$J_M = J_{M_W} \cup J_{M_H} \cup J_{M_B} \quad (4.11)$$

---

<sup>21</sup> Es ist zu beachten, dass für die Quantifizierung energetischer und materieller Ressourcen unterschiedliche Verbraucher modelliert werden können. Für die Feststellung der energetischen Ressourcenflüsse einer WZM werden häufig einzelne Aggregate modelliert. Die materiellen Ressourcenflüsse beziehen sich i. d. R. auf die gesamte WZM als Verbraucher.

Wie bei den energetischen Brutto-Input-Ressourcenströmen werden die Verbräuche während der einzelnen Prozessschritte berechnet und anschließend zu einem Gesamtverbrauch pro Produkt und Prozess addiert. Bei den materiellen Ressourcen gibt es zwei Arten von Fertigungsressourcen, die sich nicht sinnvoll auf die Prozessschritte aufteilen lassen. Dies sind einerseits die Werkstoffe, welche nur zu den Hauptzeiten auftreten und andererseits diskontinuierliche Betriebsstoffe, welche in regelmäßigen Abständen ausgetauscht oder nachgefüllt werden müssen. Abbildung 36 zeigt die Zusammensetzung der *materiellen Brutto-Input-Ressourcenströme pro Produkt und Prozess* ( $r_{in j} \mid j \in J_M$ ).

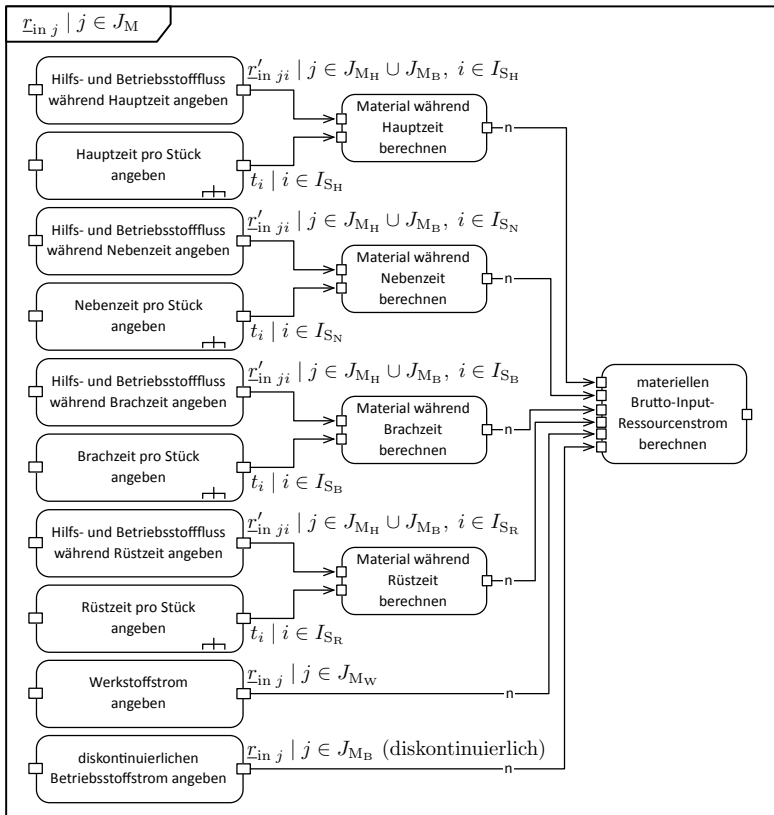


Abbildung 36: Quantifizierung von materiellen Brutto-Input-Ressourcenströmen

Für die beiden Material-Kategorien Hilfs- und (kontinuierliche) Betriebsstoffe ( $j \in J_{M_H} \cup J_{M_B}$ ) können die Ressourcenflüsse für jeden Prozessschritt und jeden Verbraucher angegeben werden. Werkstoffe enthalten Rohstoffe und Halbzeuge für das Produkt, welche in keinem vorhergehenden Prozess berücksichtigt sind. Die Werkstoffe und Hilfsstoffe, die als Zwischenprodukt in den Prozess eingehen, werden nicht bilanziert (vgl. Abschnitt 4.2.2.1 bzw. Abschnitt 4.2.2.3). Da die einzige Veränderung des Produkts während der Hauptzeit stattfindet und die Masse meist absolut und nicht auf die Zeit bezogen vorliegt, werden Werkstoffe ( $j \in J_{M_W}$ ) i. d. R. direkt als materielle Ressourcenströme angegeben. Neben den gewöhnlichen, beliebig teilbaren Betriebsstoffen existieren die diskontinuierlichen Betriebsstoffe, welche in größeren, regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden müssen, wie z. B. Werkzeuge. Diese Betriebsstoffe werden nicht auf die einzelnen Prozessschritte aufgeteilt. Stattdessen werden sie auf die Anzahl der Produkte in ihrem Wechselintervall bezogen und prozessschrittübergreifend als Ressourcenströme angegeben.

Die quantifizierten *energetischen und materiellen Input-Ressourcenflüsse pro Produkt und Prozess* ( $r'_{in\ j\ i} \mid j \in J$  und  $i \in I_S$ ) können über alle in dem Prozess verwendeten Verbraucher summiert werden und in die Ressourcenfluss-Prozessschritt-Matrix der Brutto-Input-Ressourcen ( $\underline{R}'_{in}$ ) eingefügt werden (vgl. Gleichung (4.6)). Durch die Multiplikation der Matrix mit dem Vektor der Arbeitszeiten erfolgt die Berechnung des Brutto-Input-Ressourcenstrom-Vektors ( $\underline{r}_{in}$ ) gemäß Gleichung (4.8), welcher um Werkstoffströme und diskontinuierliche Betriebsstoffströme ergänzt wird.

### 4.3.3.3 Materielle Brutto-Output-Ressourcenströme

Die Output-Ressourcenflüsse sowie -ströme werden nur für materielle Ressourcen beschrieben, da für die Bestimmung der Energieeffizienz-Kennzahlen allein die Produkt- und Input-Ressourcenströme benötigt werden (vgl. Abschnitt 3.4.4). Abbildung 37 zeigt die Zusammensetzung der materiellen Brutto-Output-Ressourcenströme. Für die Quantifizierung der Brutto-Output-Ressourcenströme<sup>22</sup> wird auf die getroffene Unterteilung der materiellen Ressourcen zurückgegriffen (vgl. Abschnitt 4.3.3.2). Wie in den vorangegangenen Modellen wird zunächst eine Aufteilung in die einzelnen Prozessschritte vorgenommen. Ausgenommen von dieser Aufteilung sind, analog zu den materiellen Brutto-Input-Ressourcenströmen, die Werkstoffe und die diskontinuierlichen

---

<sup>22</sup> Da sich die materiellen Input-Ressourcen im Prozess durch thermische oder chemische Einwirkung und Vermischung verändern können, kann der Fall eintreten, dass Output-Ressourcen auftreten, die nicht als Input-Ressourcen in den Prozess eingegangen sind.



Betriebsstoffe. Den jeweiligen Prozessschritten sind nur die Hilfsstoff- und Betriebsstoff-Ressourcenflüsse zugeordnet.

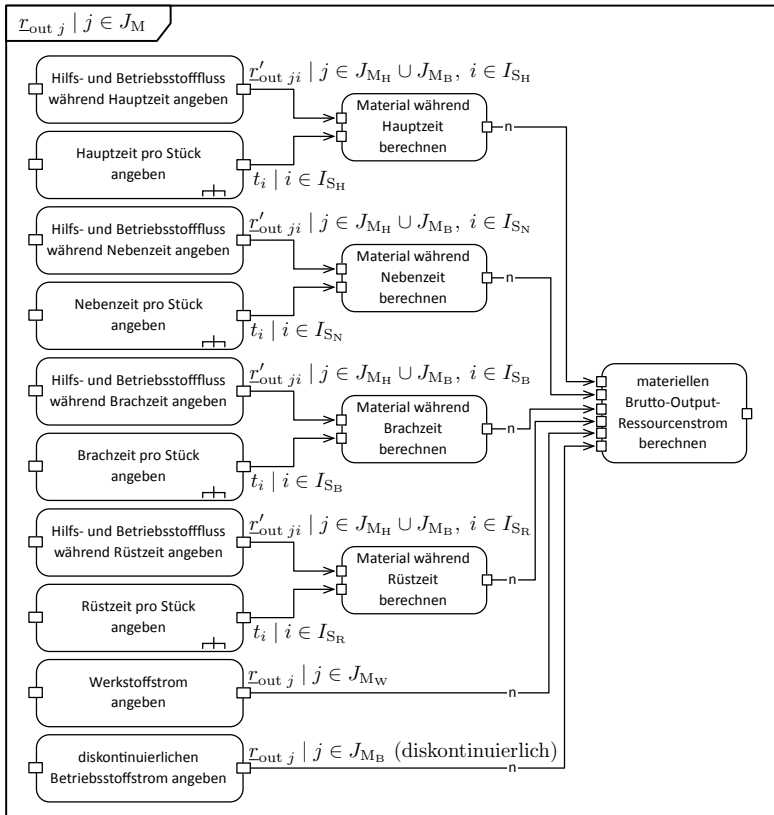


Abbildung 37: Quantifizierung von materiellen Brutto-Output-Ressourcenströmen

Die quantifizierten *materiellen Output-Ressourcenflüsse pro Produkt und Prozess* ( $r'_{out ji} \mid j \in J_M$  und  $i \in I_S$ ) können über alle in dem Prozess verwendeten Verbraucher summiert und in die Ressourcenfluss-Prozessschritt-Matrix der Brutto-Output-Ressourcen ( $\mathbf{R}'_{out}$ ) eingefügt werden (vgl. Gleichung (4.7)). Durch die Multiplikation der Matrix mit dem Vektor der Arbeitszeiten erfolgt die Berechnung des Brutto-Output-Ressourcenstrom-Vektors ( $\mathbf{r}_{out}$ ) laut Gleichung (4.9), welcher um Werkstoffströme und diskontinuierliche Betriebsstoffströme ergänzt wird.

### 4.3.4 Modellierung der Reuse-Ressourcenströme

#### 4.3.4.1 Energetische Reuse-Ressourcenströme

Die Reuse-Ressourcenströme ( $\tilde{r}_j \mid j \in J$ ) treten immer zwei mal auf – einmal als Input- und einmal als Output-Ressourcenstrom. Wie bereits in Abschnitt 4.2.2.1 beschrieben, werden die Ressourcen keiner großen Aufbereitung unterzogen, wodurch die Input- und Output-Ressourcenströme übereinstimmen. Die Reuse-Ressourcenströme müssen daher lediglich einmal und nicht als Input und Output getrennt quantifiziert werden, wie dies bei den Brutto-Ressourcenströmen der Fall ist. Die quantifizierten Ressourcenströme werden anschließend den entsprechenden Prozessen als Input- oder Output-Reuse-Ressourcenstrom ( $\tilde{r}_{in\ j}$  oder  $\tilde{r}_{out\ j} \mid j \in J$ ) zugeordnet. Abbildung 38 stellt die Quantifizierung der energetischen Reuse-Ressourcenströme dar.

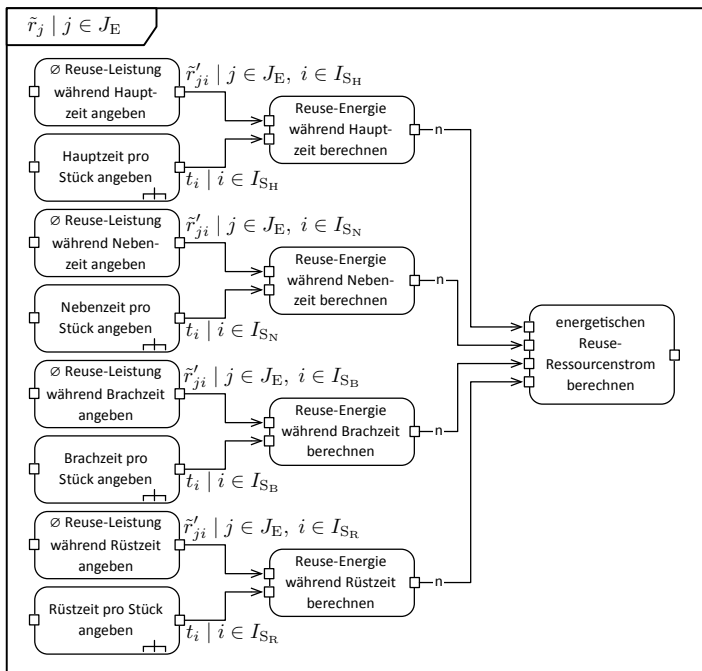


Abbildung 38: Quantifizierung von energetischen Reuse-Ressourcenströmen

Für die Wiederverwendung von Energie, welche auch als Rekuperation bezeichnet wird, sind i. d. R. technische Maßnahmen in dem Prozess, der den Output-Reuse-Ressourcenstrom aufweist, erforderlich. Dennoch verändert sich die Ressource selbst nicht. So wird beim Abbremsen von Werkzeugspindeln, die selbst mit elektrischer Energie betrieben werden, in vielen Fällen die kinetische Energie, mithilfe der als Generator fungierenden Elektromotoren, in elektrische Energie umgewandelt oder ein Wärmetauscher zur Nutzung von Abwärme eingesetzt.

Zur Ermittlung der *energetischen Reuse-Ressourcenströme pro Produkt und Prozess* ( $\tilde{r}_j \mid j \in J_E$ ) wird eine Aufteilung in die einzelnen Prozessschritte durchgeführt (vgl. Abbildung 38). Für jeden Prozessschritt wird die durchschnittlich rekuperierte Leistung ( $\tilde{r}'_{ji} \mid j \in J_E$  und  $i \in I_S$ ) mit der entsprechenden Arbeitszeit ( $t_i \mid i \in I_S$ ) multipliziert und über alle Prozessschritte hinweg summiert.

#### 4.3.4.2 Materielle Reuse-Ressourcenströme

Zur Quantifizierung der *materiellen Reuse-Ressourcenströme pro Produkt und Prozess* ( $\tilde{r}_j \mid j \in J_M$ ) wird, wie auch in dem Modell zur Quantifizierung der Brutto-Ressourcenströme, eine Aufteilung der Ressourcenflüsse in die einzelnen Prozessschritte sowie in Werkstoff- und diskontinuierliche Betriebsstoffströme durchgeführt (vgl. Abbildung 39).

Für die Berechnung von Betriebsstoffflüssen ( $\tilde{r}'_{ji} \mid j \in J_{M_B}$  und  $i \in I_S$ ) sind zwei Alternativen modelliert (vgl. Abbildung 40). Die erste Möglichkeit setzt das Wissen über den Reuse-Anteil des Betriebsstoffs voraus. Bei der zweiten Alternative werden die regelmäßig nachgefüllten oder ausgetauschten Betriebsstoffquantitäten auf die in diesem Zeitintervall hergestellten Produkte umgelegt, was einen durchschnittlichen Verbrauch pro Produkt ergibt. Dieser Verbrauch wird gleichmäßig über die Betriebsmittelzeit (vgl. Abbildung 30) eines Produkts verteilt. Schließlich wird der durchschnittliche Verbrauch pro Zeiteinheit von dem Brutto-Input-Betriebsstofffluss abgezogen. Für einzelne Prozessschritte können sich durch diese Art der Berechnung negative materielle Ressourcenflüsse ergeben, über alle Prozessschritte betrachtet, ergibt sich aber der tatsächliche Reuse-Ressourcenfluss und die Modellierung wird vereinfacht.

Ebenso wie für die Berechnung der kontinuierlichen Betriebsstoffflüsse existieren zur Ermittlung der diskontinuierlichen Betriebsstoffströme zwei Alternativen. Es kann entweder der Reuse-Anteil eines diskontinuierlichen Betriebsstoffs eingegeben werden, welcher mit dem Brutto-Input-Betriebsstoffstrom multipliziert wird, oder mithilfe des nachgefüllten Betriebsstoffs pro Zeiteinheit und der Anzahl an Produkten pro Zeiteinheit der wiederverwendete Betriebsstoffstrom ermittelt werden.

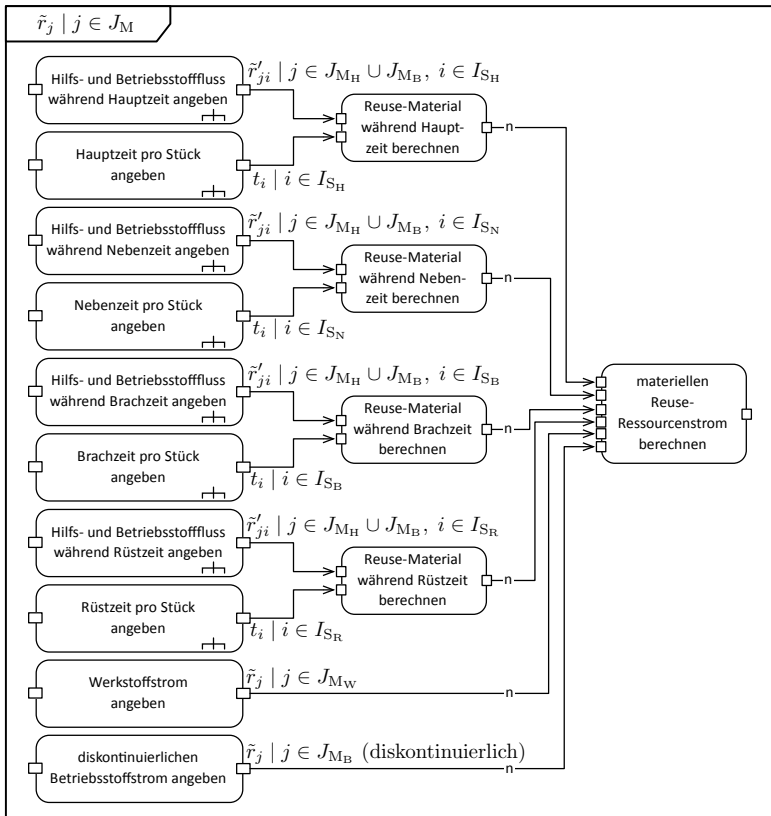


Abbildung 39: Quantifizierung von materiellen Reuse-Ressourcenströmen

Die angegebenen *energetischen und materiellen Input- bzw. Output-Reuse-Ressourcenflüsse pro Produkt und Prozess* ( $\tilde{r}'_{ji} | j \in J$  und  $i \in I_S$ ) können über alle in dem Prozess verwendeten Verbraucher summiert und in eine Ressourcenfluss-Prozessschritt-Matrix der Input- bzw. Output-Reuse-Ressourcen ( $\tilde{\mathbf{R}}'_{in}$  bzw.  $\tilde{\mathbf{R}}'_{out}$ ) des Prozesses eingefügt werden. Durch die Multiplikation der Matrix mit dem Vektor der Arbeitszeiten erfolgt die Berechnung des Input- bzw. Output-Reuse-Ressourcenstrom-Vektors ( $\tilde{\mathbf{r}}_{in}$  bzw.  $\tilde{\mathbf{r}}_{out}$ ).

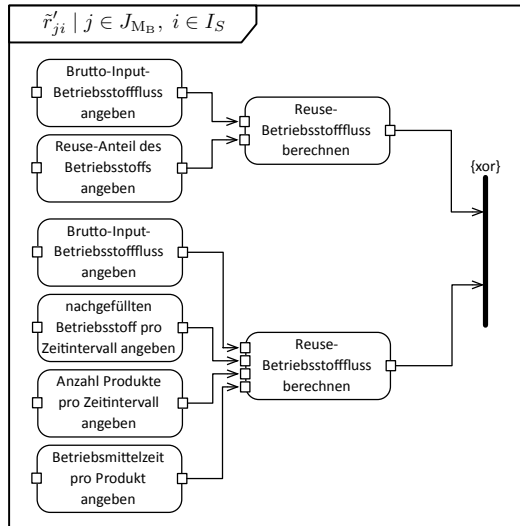


Abbildung 40: Berechnungsalternativen für Reuse-Betriebsstoffflüsse

### 4.3.5 Berechnung der Netto-Ressourcenströme

Wie in der Funktionsmenge eines Prozesses ( $p_i \mid i \in I_P$ ) in Gleichung 4.3 aufgeführt, lassen sich die Netto-Ressourcenströme ( $r_j \mid j \in J$ ) aus der Differenz der bereits quantifizierten Brutto- und Reuse-Ressourcenströme sowohl für die Inputs als auch für die Outputs berechnen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 41 und Abbildung 42 dargestellt.

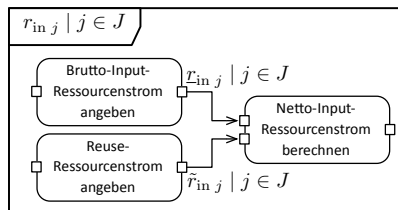


Abbildung 41: Berechnung von Netto-Input-Ressourcenströmen

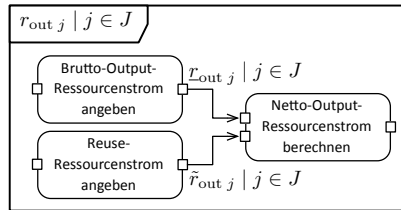


Abbildung 42: Berechnung von Netto-Output-Ressourcenströmen

### 4.3.6 Modellierung der Produkt-Ressourcenströme

#### 4.3.6.1 Energetische Produkt-Ressourcenströme

**Vorüberlegungen.** Generell existieren für die Bestimmung der energetischen Produkt-Ressourcenströme mehrere mögliche Vorgehensweisen. Die *erste Möglichkeit* zur Bestimmung dieser Energie ist der Vergleich der benötigten energetischen Ressourcenströme aller vorliegenden Prozesskettenalternativen. Dabei kann der geringste Energieaufwand aller Prozessketten als gemeinsames Minimum betrachtet werden und als Produkt-Energie-Ressourcenstrom für alle zu vergleichenden Prozessketten verwendet werden. Bei diesem Vorgehen existieren zwei große Nachteile. Zunächst stellt das Minimum ausgewählter Alternativen keine absolute Bezugsgröße für den Vergleich von Prozessketten dar. Die resultierende Kennzahl wäre somit immer nur eine relative Größe, die lediglich eine Aussage im aktuellen Kontext erlaubt, was aber z. B. die Bewertung einer einzelnen Prozesskette unmöglich macht. Zweitens können Verschwendungen nur eingeschränkt identifiziert werden, da die Bewertung auf einem lokalen statt einem globalen Minimum basiert. Eine Prozesskette könnte eine maximale Effizienz aufweisen, obwohl überflüssige Fertigungsschritte enthalten sind, wodurch ein eventueller Handlungsbedarf nicht erkannt wird.

Die *zweite Möglichkeit* der Berechnung ist eine physikalische Betrachtung der einzelnen Technologien. Dabei könnte beispielsweise für Trenntechnologien die zu überwindende Bindungsenergie im Material verwendet werden. Dies würde auch die Vergleichbarkeit verschiedener Prozessketten ermöglichen, welche nicht gemeinsam bewertet werden. Zudem ist nicht der minimale tatsächliche Aufwand, sondern der theoretisch notwendige Aufwand die Bezugsgröße für alle Prozessketten. Neben der sehr komplizierten Ermittlung der theoretischen Energie für die Fertigungsverfahren aller Hauptgruppen, stellt der Vergleich verschiedener Technologien mit dem gleichen Nutzen, d. h. die Realisierung der gleichen Produktfeatures, das größte Hindernis dar. Beispielsweise ist der Nutzen des Fügens beim Schweißen, Schrauben und Kleben für ein Produkt, trotz unterschiedlicher physikalischer Vorgänge, identisch. Dies führt dazu,

dass der Vergleich bestimmter Prozesse aufgrund verschiedener physikalischer Wirkmechanismen keine Aussagekraft hat. Da der Nutzen jedes Prozesses physikalisch einzeln bewertet wird, ist es zudem möglich, dass ein später wieder aufgehobener Nutzen eines früheren Prozesses, d. h. eine Änderung am Produkt, die nicht in das Endprodukt eingeht, als Produktnutzen betrachtet wird. Deshalb darf nicht der Nutzen der einzelnen Prozessschritte aufsummiert werden, sondern es muss der Nutzen im Bezug auf das Produkt energetisch bewertet werden.

Die *dritte Möglichkeit* die energetischen Produkt-Ressourcenströme zu ermitteln, ist das Festlegen von Referenz-Energiebeträgen für bestimmte Produkteigenschaften. Diese Energiebeträge werden von den erzeugten Produktfeatures vorgegeben und werden je nach Prozesskette von unterschiedlichen Fertigungsprozessen erzeugt. Für einen Vergleich ist es wichtig, dass die alternativen Prozessketten die gleichen Produktfeatures erzeugen. Durch Prozessketten, die aus einem einzigen Prozess bestehen, werden zudem Aussagen über einzelne Prozesse möglich. Diese letzte Möglichkeit, die energetischen Produkt-Ressourcenströme einer Prozesskette zu bestimmen, wird vor dem Hintergrund der Zielsetzung dieser Arbeit als vielversprechendster Ansatz angesehen und kommt daher in dieser Arbeit zur Anwendung (vgl. Abschnitt 4.2.2.2).

**Ansatz.** Die energetischen Produkt-Ressourcenströme ( $r_{\text{pro},j} \mid j \in J_E$ ) werden, wie in Abschnitt 4.2.2.2 beschrieben, in Abhängigkeit der erzeugten Produktfeatures bestimmt. Grundsätzlich sollten die bereits bei der Technologieplanung oder Produktentwicklung eingesetzten Features herangezogen werden. Für die erfolgreiche Anwendung des Ansatzes müssen folgende Anforderungen erfüllt sein:

1. Alle Fertigungsprozesse müssen einen Referenz-Energiebetrag erhalten können.
2. Die Features dürfen nicht von einem bestimmten Fertigungsprozess abhängen.
3. Der Referenz-Energiebetrag muss sich auf Produktgeometrien beziehen.
4. Die energetischen Produkt-Ressourcenströme sollten möglichst einfach zu bestimmen sein.

Abbildung 43 zeigt mögliche Produktfeatures ( $f_i \mid i \in I_F$ ) und deren Zuordnung zu den Hauptgruppen der DIN 8580 (2003). Die Zuordnung in Abbildung 43 stellt eine mögliche Definition dar, die die ersten beiden Anforderungen erfüllt.

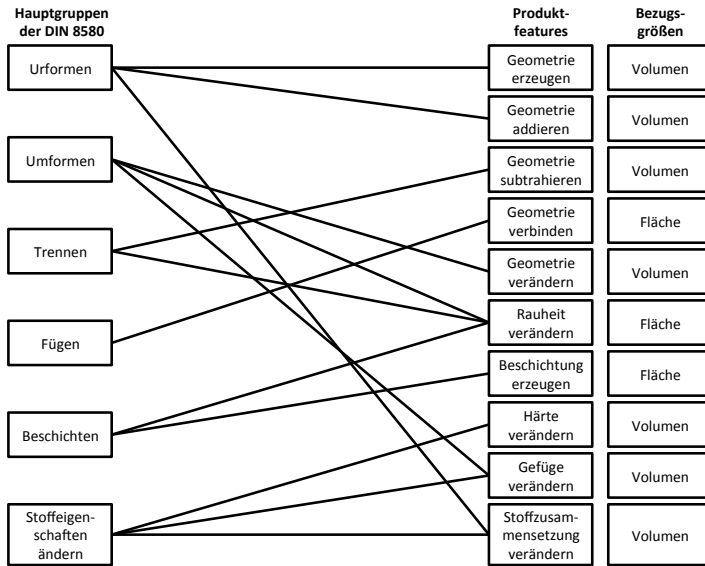


Abbildung 43: Zuordnung der Produktfeatures und deren Bezugsgrößen zu den Hauptgruppen der DIN 8580 (2003)

Von der dritten Anforderung kann abgeleitet werden, dass der Referenz-Energiebetrag ( $h_i \mid i \in I_H$ ) für ein Feature immer von einer Fläche oder einem Volumen als Bezugsgröße ( $d_i \mid i \in I_D$ ) abhängig ist. Da auch semantische Features immer mit einem Form-Feature verknüpft sind, werden Features immer über die Flächen- und Volumenelemente eines Produkts beschrieben. Die Basis-Referenz-Energiebeträge je Flächen- bzw. Volumeneinheit werden von Experten festgelegt. Für die unterschiedlichen zu bearbeitenden Materialien und die verschiedenen Ausprägungen von Features, wie z. B. die Härte oder die Rauheit, können zusätzliche Faktoren eingeführt werden, die zur Bestimmung des Referenz-Energiebetrags eines Features beitragen (vgl. Abbildung 44). Damit ist die vierte Anforderung erfüllt, auch wenn zunächst einige Erfahrung über die sinnvolle Festlegung der Referenz-Energiebeträge für das konkrete Unternehmen und dessen Anwendungsbereiche gesammelt werden müssen. Der Referenz-Energiebetrag wird schließlich mit der realen Geometrie des Produkts verrechnet, wodurch sich der energetische Produkt-Ressourcenstrom eines Features ergibt. Die Summe über die energetischen Produkt-Ressourcenströme aller Features gibt den Produkt-Energiebedarf ( $r_{\text{pro } j} \mid j \in J_E$ ) der Prozesskette ( $k_i \mid i \in I_K$ ) wieder (vgl. Gleichung (4.10)).



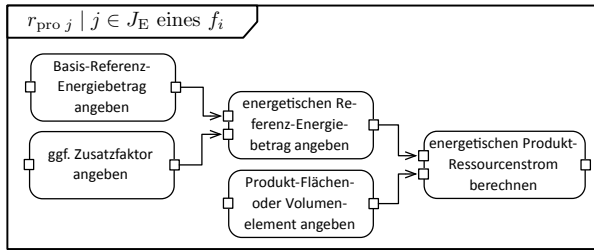


Abbildung 44: Quantifizierung des energetischen Produkt-Ressourcenstroms eines Features

### 4.3.6.2 Materielle Produkt-Ressourcenströme

Die materiellen Produkt-Ressourcenströme ( $r_{\text{pro } j} \mid j \in J_M$ ) beinhalten exakt die Ressourcen, die final in das optimale Endprodukt der Prozesskette eingehen. Die materiellen Produkt-Ressourcenströme lassen sich, wie in Abbildung 45 dargestellt, in Werkstoff- und Hilfsstoffströme unterteilen. Diese Unterscheidung zeigt explizit den Anteil des Hilfsstoffs im Produkt auf und weist eine analoge Modellierung zu den anderen materiellen Ressourcenströmen auf.

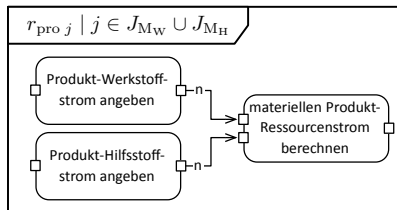


Abbildung 45: Quantifizierung von materiellen Produkt-Ressourcenströmen

## 4.4 Modellierungsprinzipien für den Alternativenvergleich

In diesem Kapitel wurde die Modellierung von Prozessketten und die Quantifizierung der Ressourcenströme beschrieben. Die Brutto-, Reuse- und Netto-Ressourcenströme wurden jeweils für einen Prozess der Prozesskette zur Fertigung des Produkts modelliert und werden anschließend über alle Prozesse kumuliert. Die Produkt-Ressourcenströme gelten für die Herstellung eines Produkts durch die gesamte Prozesskette. Für einen sinnvollen und umfassenden Vergleich der Ressourceneffizienz alternativer Prozessketten sind folgende weitere Randbedingungen bei der Modellierung zu beachten:

- Alle Alternativen müssen die vorgegebene Stückzahl des Produkts in dem zur Verfügung stehenden Zeitrahmen bearbeiten können. Die aus der nötigen Belegung der Schichten resultierenden Verbräuche, insbesondere im Bezug auf die energetischen Ressourcen, müssen berücksichtigt werden.
- Kommt es bei einer Prozesskette, z. B. aufgrund des niedrigen Reifegrads einer Technologie, zu Ausschuss, muss dies bei der zu produzierenden Stückzahl berücksichtigt werden. Zusätzlich muss der Ausschuss, insofern dieser keinen Reuse-Ressourcenstrom darstellt, seitens der Output-Ressourcenströme aufgeschlagen werden.
- Die erzeugte Wertschöpfung, d. h. die Produktfeatures, muss als funktionelle Einheit bei allen alternativen Prozessketten des Vergleichs übereinstimmen. Wird darüber hinaus in der Prozesskette weitere Wertschöpfung am Produkt vollzogen, wird diese im Rahmen des Vergleichs nicht berücksichtigt, da der Nutzen bei der Bewertung als fix angesehen wird.

Sollen einzelne Fertigungsprozesse verglichen werden, so gilt: Die Bewertung bzw. der Vergleich unterschiedlicher Fertigungsprozesse entspricht der Bewertung bzw. dem Vergleich von Fertigungsprozessketten, die aus genau einem primären Prozess bestehen.

Treten Ausschuss oder weitere außerordentliche Ressourcenströme auf, sollten für jede Alternative eines Vergleichs die Ressourcenströme gesamthaft für die zu produzierende Stückzahl angegeben werden, damit diese Nebenbedingungen, ohne den Aufwand für die Umlage auf ein Stück des Produkts, in die Bewertung integriert werden können. Ist  $a$  die Anzahl an Ausschuss- oder Sondereinheiten des Produkts und  $b$  die zu fertigende Stückzahl, werden die Gleichung (3.1) und Gleichung (3.2) zur Berechnung der Material- und Energieeffizienz im engeren Sinne wie folgt angepasst:

$$\mu_{ieS} = \frac{b \cdot \sum_{j \in J_M} r_{pro\ j}}{(a + b) \cdot \sum_{j \in J_M} r_{in\ j} + (a + b) \cdot \sum_{j \in J_M} r_{out\ j} + a \cdot \sum_{j \in J_M} r_{pro\ j}} \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_{ieS} = \frac{b \cdot \sum_{j \in J_E} r_{pro\ j}}{(a + b) \cdot \sum_{j \in J_E} r_{in\ j} + a \cdot \sum_{j \in J_E} r_{pro\ j}} \quad (4.13)$$

Die Berechnung der Material- und Energieeffizienz im weiteren Sinne, also Gleichung (3.6) und Gleichung (3.7), wird analog erweitert. Die Bewertung der Ressourceneffizienz erfolgt weiterhin unverändert wie in den Gleichung (3.3) und Gleichung (3.8) beschrieben.

## 5 Charakterisierung von Ressourcen

### 5.1 Allgemeines

Für die Charakterisierung der Ressourcen werden, wie bereits in Abschnitt 3.4.3 und Abschnitt 3.4.4 vorgestellt, Ressourcenfaktoren für Input-  $\omega_{in,j}$  und Output-Ressourcen  $\omega_{out,j}$  abgeleitet. Das Vorgehen für die Bestimmung dieser charakteristischen Ressourcenfaktoren wird in dem vorliegenden Kapitel vorgestellt.

Zunächst wird die im Rahmen der Bestimmung aufkommende Bewertungsaufgabe beschrieben (vgl. Abschnitt 5.2). Anschließend wird die strukturierte Ableitung einer Kriterienhierarchie zur Beschreibung der Ressourceneffizienz in der Produktion vorgestellt (vgl. Abschnitt 5.3). Aufgrund des hohen Abstraktionsgrads der Ressourceneffizienz-Kriterien werden diese operationalisiert, womit deren Zuordnung zu bereits im Bereich der Wirkungsabschätzung bestehenden, quantifizierbaren Indikatoren einhergeht. Auf Basis der festgelegten Kriterien werden Ansätze der Entscheidungstheorie und hier insbesondere die Verfahren der multikriteriellen Bewertung herangezogen, um die Ressourcenfaktoren abzuleiten (vgl. Abschnitt 5.4). Abschließend erfolgen einige Erläuterungen zur Anwendung des entwickelten Vorgehens, die die praktische Umsetzung zusätzlich unterstützen (vgl. Abschnitt 5.5).

### 5.2 Beschreibung der Bewertungsaufgabe

#### 5.2.1 Allgemeines

Die Ressourcenfaktoren sind Eingangsgrößen für die in Abschnitt 3.4.4 definierten Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung und ermöglichen eine Beurteilung der Ressourceneffizienz im weiteren Sinne (vgl. Gleichung (3.6), Gleichung (3.7) und Gleichung (3.8)). Die Aufgabe eines Ressourcenfaktors  $\omega_{in,j}$  bzw.  $\omega_{out,j}$  ist es, die Eigenschaften der Ressource  $j$  als Input bzw. Output sowie ihrer Vor- bzw. Nachprozesse hinsichtlich der Ressourceneffizienz durch eine quantitative Größe auszudrücken. Die Bestimmung von Ressourcenfaktoren kommt damit einer eigenständigen Bewertung von einzelnen Ressourcen gleich. Um Ressourcenfaktoren für alle Ressourcen einheitlich abzuleiten und deren Vergleichbarkeit zu gewährleisten, bedarf es eines methodischen Vorgehens.

### 5.2.2 Bewertungsgrundlage

Das Vorgehen zur Ressourcenbewertung muss mit der Identifikation der für die Ressourceneffizienz relevanten Eigenschaften einer Ressource und ihrer Vor- bzw. Nachprozesse beginnen, da sie die Basis der Ressourcenbewertung darstellen. Die Bewertungsliteratur fordert hierfür zunächst die Definition eines Zielsystems für den Bewertungsfall. Ziele, die zur Messung des Zielerfüllungsgrads geeignet sind, werden Kriterien genannt. Um die Kriterien so weit herunterzubrechen, bis sie messbaren Eigenschaften, sogenannten Attributen, der Bewertungsobjekte entsprechen, werden Kriteriensysteme häufig in Form von hierarchischen Strukturen entwickelt (SCHNEEWEISS 1991, S. 58 ff.). Im vorliegenden Fall muss somit ein Kriteriensystem für die Ressourceneffizienz von Input- und Output-Ressourcen erstellt werden, das aufzeigt, welche Attribute der Ressourcen für deren Bewertung relevant sind.

### 5.2.3 Bewertungsverfahren

Nachdem im Rahmen des Kriteriensystems für die Bestimmung der Ressourceneffizienz von Ressourcen voraussichtlich eine Vielzahl an Kriterien vorliegt, ist ein Verfahren erforderlich, das mehrere Kriterien berücksichtigen und integrieren kann. Gleichzeitig sollte es die Struktur des Kriteriensystems abbilden. Außerdem sollte das Verfahren eine große Flexibilität hinsichtlich der Eingangsdaten aufweisen, die die Ausprägungen der Attribute der Ressourcen beschreiben. Diese können quantitativer oder qualitativer Natur sein. Zusätzlich können die Daten in manchen Fällen mit Unsicherheit belegt sein. Wie in der Anforderung A8 in Abschnitt 3.2 gefordert, gilt es zudem den Bewertungs- und Berechnungsaufwand gering zu halten, um damit die Anwendung der gesamten Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung effizient zu gestalten.

Wie dies u. a. auch HAES ET AL. (2002, S. 189 ff.) im Rahmen ihrer Kritik an existierenden Methoden zur Wirkungsabschätzung vorschlagen, sollte bei derartigen Bewertungsproblemen, die bereits bestehende wissenschaftliche Basis des Operations Research herangezogen werden. Das Operations Research befasst sich allgemein mit der Suche nach der bestmöglichen Entscheidung unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen (NEUMANN & MORLOCK 2002). Das für die Bestimmung des Ressourcenfaktors relevante Teilgebiet des Operations Research<sup>23</sup> ist die Entscheidungstheorie, die sich mit der logischen und empirischen Analyse des rationalen Entscheidungsverhaltens in unterschiedlichen Situationen beschäftigt (NEUMANN & MORLOCK 2002, S. 732) und sich nach

---

<sup>23</sup> Weitere Teilgebiete des Operations Research umfassen beispielsweise die lineare Optimierung oder die Spieltheorie.

folgenden Unterscheidungsmerkmalen untergliedern lässt (vgl. SCHNEEWEISS (1991, S. 93)):

- Anzahl der an der Entscheidung beteiligten Personen: Ein- oder Mehrpersonen-Entscheidungsprobleme
- Anzahl der Ziele: Ein- oder Mehrzielprobleme
- Bestimmtheitsgrad der Entscheidungsprobleme (z. B. Entscheidungen unter Sicherheit oder Unsicherheit)

Wird ein produzierendes Unternehmen als eine Person betrachtet, so handelt es sich im vorliegenden Fall um ein Einpersonen-Entscheidungsproblem. Aufgrund der Vielzahl der Kriterien liegt außerdem ein Mehrzielproblem vor. Im Rahmen dieser Arbeit werden Entscheidungsprobleme unter Sicherheit betrachtet<sup>24</sup>. Damit schränkt sich der Bereich auf Einpersonen-Mehrziel-Entscheidungen unter Sicherheit ein, welche unter dem Begriff des Multiple Criteria Decision Making (MCDM) bekannt sind. Bei dieser Art von Entscheidung geht es darum, die Alternativen nach deren Ausprägungen bezüglich der Kriterien zu ordnen (Höhenpräferenz) und gleichzeitig die Wichtigkeit der Kriterien untereinander zu berücksichtigen (Artenpräferenz) (vgl. SCHNEEWEISS (1991, S. 95 f.)). Ein Merkmal, anhand dessen sich die Probleme des MCDM weiter einschränken lassen, ist die Anzahl an Alternativen, die bei der Entscheidung zur Verfügung stehen. Ist die Anzahl der Alternativen endlich, so handelt es sich um ein Problem des Multiple Attribute Decision Making (MADM). Ist die Anzahl unendlich, so wird von Multiple Objective Decision Making (MODM) gesprochen. Da die Anzahl der zu charakterisierenden Ressourcen im vorliegenden Fall endlich ist, kommen ausschließlich Verfahren des MADM in Frage. Die bestehenden MADM-Verfahren müssen daher auf ihre Eignung für den Einsatz zur Bewertung der Ressourcen hin untersucht werden. Das oder die zielführenden Verfahren müssen anschließend exakt auf das vorliegende Bewertungsproblem angepasst werden.

---

<sup>24</sup> Bei Bedarf können Entscheidungsprobleme unter Sicherheit angepasst werden, um auch mit Unsicherheiten belegte Eingangsdaten verarbeiten zu können. Statistische Unsicherheiten können hierbei als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen modelliert werden. Eine Verrechnung der unsicheren Daten analog zu den Berechnungen der sicheren Daten kann mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation erfolgen. Die in der Unschärfe von Aussagen begründeten Unsicherheiten können mithilfe der Fuzzy-Set-Theorie wiederum in statistische Unsicherheiten überführt und anschließend entsprechend verrechnet werden (KREBS 2012, S. 88 ff.).

### 5.2.4 Bestandteile des Bewertungsvorgehens

Das Vorgehen zur Bestimmung der Ressourcenfaktoren soll sich an existierende Verfahren des MADM anlehnen. Wie oben beschrieben, erfolgt ein derartiges Bewertungsvorgehen in mehreren Schritten, welche in Abbildung 46 dargestellt sind. Zunächst müssen die Ressourceneffizienz-Kriterien abgeleitet werden. Dies geschieht in Abschnitt 5.3. Dabei sollten am Ende geeignete Kriterien für Input- bzw. Output-Ressourcen zur Verfügung stehen, die die Basis für die Ableitung des jeweiligen Ressourcenfaktors  $\omega_{in,j}$  bzw.  $\omega_{out,j}$  darstellen. Die Kriterien werden anschließend gewichtet (Artenpräferenz), so dass sie die Präferenzen des Entscheiders widerspiegeln. Außerdem müssen die Ressourcen nach deren Ausprägungen bezüglich der Kriterien beurteilt werden (Höhenpräferenz). Schließlich werden alle Informationen aggregiert und zu einem Ressourcenfaktor kombiniert. Dieser liefert eine quantitative und vergleichbare Aussage über die Vorteilhaftigkeit der Ressource bezüglich der Ressourceneffizienz in der Fertigung. Diese Schritte des Vorgehens werden in Abschnitt 5.4 erläutert.

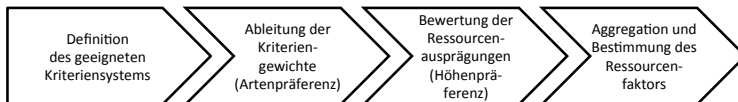


Abbildung 46: Grundzüge des Verfahrens zur Bestimmung der Ressourcenfaktoren

## 5.3 Identifikation der Ressourceneffizienz-Kriterien

### 5.3.1 Ableitung der Kriterienhierarchie

#### 5.3.1.1 Methodische Grundlagen

Für die Identifikation der Ressourceneffizienz-Kriterien werden im Rahmen dieser Arbeit Aspekte der Methode des Axiomatic Design (AD) nach SUH (1990) verwendet. Das AD ist ursprünglich eine Methode aus dem Bereich der Produktentwicklung zum strukturierten Entwurf von Systemen. Die Konventionen für die Durchführung eines AD-Prozesses werden im Folgenden kurz dargestellt, um darauf aufbauend das Kriteriensystem abzuleiten<sup>25</sup>.

Das AD gibt vier Domänen vor: die Kundendomäne, die funktionale Domäne, die physische Domäne und die Prozessdomäne. Die Kundendomäne umfasst die Wünsche des Kunden. Die Anforderungen, die aus den Kundenwünschen

<sup>25</sup> Weitere Ausführungen zu der Methode des Axiomatic Design im Allgemeinen liefert SUH (1990, 2005).

resultieren, werden in der funktionalen Domäne zusammengefasst und als „Functional Requirements“ (FR) bezeichnet. Die FR repräsentieren die minimale Anzahl unabhängiger Anforderungen, um das Designziel funktionell zu beschreiben. Anschließend wird für jede Anforderung in der physischen Domäne ein Gestaltungsparameter, auch „Design Parameter“ (DP) genannt, abgeleitet. Die FRs geben wieder, was erfüllt werden soll und die DPs zeigen auf, wie die Anforderungen umgesetzt werden. Schließlich wird in der Prozessdomäne beschrieben, wie der DP realisiert werden soll.

Wird eine abstrakte Anforderung definiert, kann nur eine grobe Idee als Gestaltungsparameter angegeben werden. Über die sogenannte Dekomposition können abstrakte FRs und DPs auf immer konkretere Teilaspekte heruntergebrochen werden, so dass sie final eine FR- sowie eine DP-Hierarchie bilden. Der Aufbau der Hierarchie kann durch das sogenannte „Zigzagging“ unterstützt werden, ein sägezahnartiges Hin- und Herspringen zwischen Anforderungen und Gestaltungsparametern, das die Anforderung schrittweise in kleinere Teilanforderungen zerlegt und zunehmend detailliert. Diese Abbildungen der Anforderungen der funktionalen Domäne auf die Gestaltungsparameter der physischen Domäne werden in einer sogenannten Designmatrix zusammengefasst. Dementsprechend zeigt die Matrix auch Abhängigkeiten zwischen FRs und DPs auf. Für die Auswahl der geeignetsten Gestaltungsparameter aus einer Menge an Lösungsalternativen gelten die beiden Axiome des AD nach SUH & HUPPES (2005, S. 25 ff.):

- Unabhängigkeits-Axiom: Die DPs sollten so gewählt werden, dass ein FR erfüllt werden kann, ohne andere FRs dadurch zu beeinflussen.
- Informations-Axiom: Es sind diejenigen DPs zu wählen, deren Erfolgswahrscheinlichkeit am größten ist.

Statt eines Systems wird in der vorliegenden Arbeit ein Konzept der Ressourceneffizienz entworfen, das es ermöglicht, geeignete Kriterien für dessen Bewertung zu definieren. Hinsichtlich der Ableitung der Ressourceneffizienz-Kriterien werden die funktionale und physische Domäne genutzt, um einerseits die Anforderungen seitens der Ressourceneffizienz festzulegen und andererseits die Gestaltungsparameter zur Erfüllung der Anforderungen zu definieren. Die DPs der unteren Ebenen entsprechen den benötigten Ressourceneffizienz-Kriterienhierarchien für Input- und Output-Ressourcen. Ein weiterer nützlicher Aspekt des AD ist das Unabhängigkeitsaxiom, das über die Designmatrix geprüft werden kann. Damit können vorhandene Abhängigkeiten zwischen FRs und DPs in einer Einflussanalyse aufgedeckt werden, so dass einer ggf. bestehenden gegenseitigen Beeinflussung von Kriterien entgegengewirkt werden kann.

### 5.3.1.2 Kriterienhierarchie der Ressourceneffizienz

Abbildung 47 zeigt die FRs der Ressourceneffizienz, wobei insbesondere die Anforderungen während der Produktionsphase eines Produkts, zu der auch dessen Fertigung gehört, detailliert dargestellt sind. Die zentrale Anforderung auf höchster Ebene ist die Maximierung der Ressourceneffizienz des Produktlebenszyklus. Auf der zweiten und dritten Ebene kann zwischen Anforderungen, die durch Planung und Konstruktion des Produkts realisiert werden müssen und Anforderungen, für deren Erfüllung die Technologieplanung zuständig ist, unterschieden werden<sup>26</sup>. Der Verbrauch natürlicher Ressourcen während der Nutzungs- und End-of-Life-Phase des Produkts (FR-11) ist insbesondere durch das Produktdesign beeinflussbar. Auch werden in der Produktentwicklung die Ressourcen, aus denen das Endprodukt besteht, festgelegt. Diese werden in dem vorliegenden Ansatz als optimaler Ressourcenverbrauch zur Erfüllung der Produktfunktionalität (FR-121) angesehen, der durch Technologieplanung und Fertigung nicht zu beeinflussen ist. Liegt das zum größten Teil definierte Produkt vor, so kann die Ressourceneffizienz in der Produktion (FR-12) allein durch die Reduktion des Ressourcenaufwands (FR-122) verbessert werden. Die Minimierung des Aufwands kann einerseits durch die Verringerung der Quantitäten der direkten Input- und Output-Ressourcenströme (FR-1221 und FR-1223) erreicht werden. Andererseits kann der gesamthafte Ressourcenaufwand durch den Einsatz von Input- und Output-Ressourcen mit geringen Auswirkungen (FR-1222 und FR-1224) reduziert werden. Da die Quantitäten bereits unmittelbar messbar sind (vgl. Abschnitt 4.3), müssen diese nicht weiter detailliert werden. Die Minimierung der Auswirkungen der Input-Ressourcen (FR-1222) und die Minimierung der Auswirkungen der Output-Ressourcen (FR-1224) werden hingegen weiter heruntergebrochen und anschließend in die Gestaltungsparameter überführt.

Die entsprechenden Gestaltungsparameter (DP-1222 und DP-1224) bilden jeweils den Ausgangspunkt für die Ressourceneffizienz-Kriterienhierarchie der Input-Ressourcen sowie die der Output-Ressourcen (vgl. Abbildung 48). Bei beiden Kriterien lassen sich wiederum jeweils zwei Unterkriterien ableiten – der Ressourcenschutz und der Umweltschutz. Das erste für die Charakterisierung von Ressourcen relevante Kriterium hinsichtlich des Ressourcenschutzes der Inputs stellt die nachhaltige Verfügbarkeit (DP-122211) dar. Die Verwendung knapper Ressourcen sollte demnach vermieden werden, um die Lebensgrundlagen für nachfolgende Generationen zu bewahren.

---

<sup>26</sup> Natürlich hat auch der Kunde je nach Art des Produkts großen Einfluss auf die Ressourceneffizienz während der Nutzungsphase des Produktlebenszyklus. Allerdings liegt der Fokus der im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Betrachtung auf den Einflussmöglichkeiten des Unternehmens bezüglich der Produkterstellung.



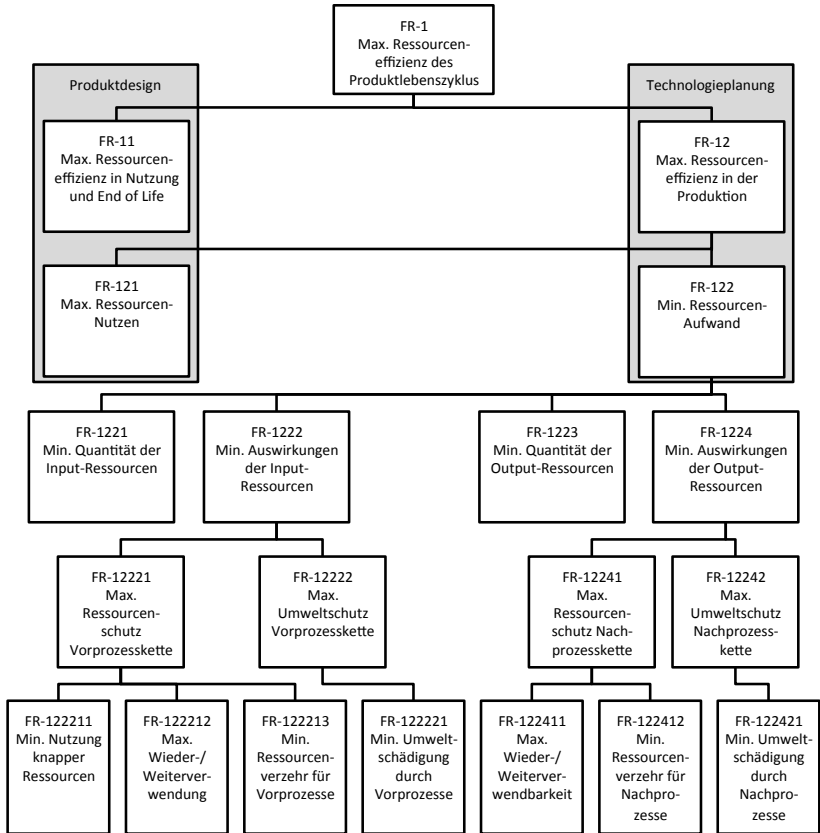


Abbildung 47: Anforderungsanalyse der ressourceneffizienten Fertigung mittels Axiomatic Design nach REINHARDT ET AL. (2012)

Dieses Ziel verfolgt auch das zweite Kriterium für Input-Ressourcen, die ressourcenschonende Zusammensetzung (DP-122212). Durch einen hohen Anteil an wieder- bzw. weiterverwendeten Ressourcen ist eine Reduktion des Abbaus von Primärressourcen möglich. Das dritte Ressourceneffizienz-Kriterium ist die verbrauchsarme Gewinnung, Verarbeitung sowie der verbrauchsarme Antransport von Input-Ressourcen (DP-122213). Bezüglich des Umweltschutzes konnte ein geringes Schädigungspotential der Input-Ressourcen und deren Vorprozesse als viertes und letztes Ressourceneffizienz-Kriterium des Inputs identifiziert werden (DP-122221). Mithilfe dieses Attributs soll bewertet werden, wie sich

die Inputs eines Prozesses beispielsweise auf die Gesundheit des Menschen oder Ökosysteme auswirken.

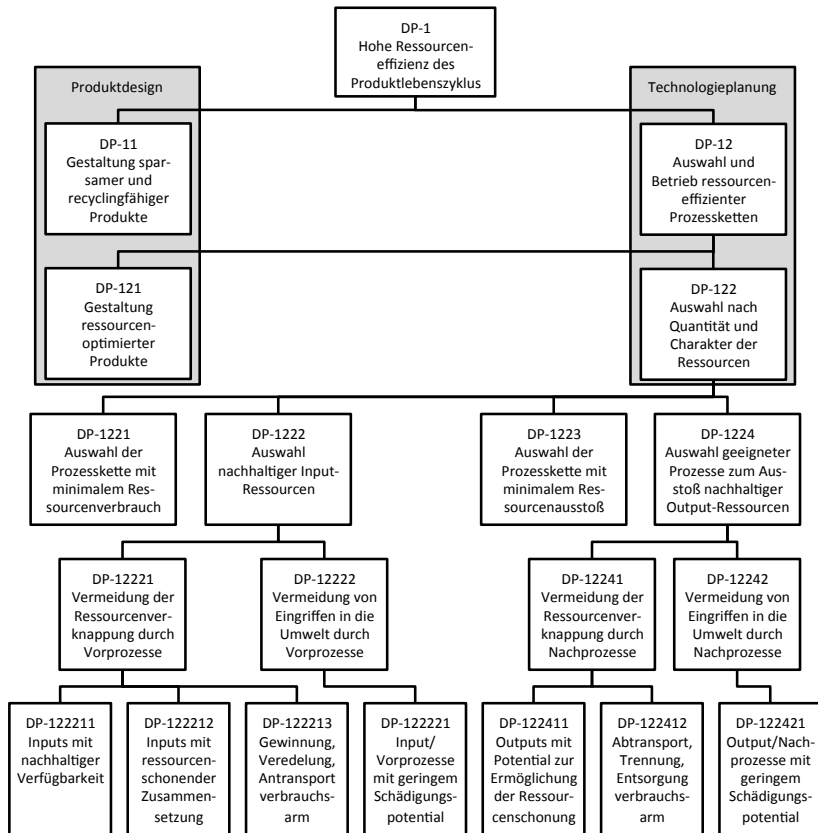


Abbildung 48: Gestaltungsparameter einer ressourceneffizienten Fertigung

Analog wurden drei Ressourceneffizienz-Kriterien für die Output-Ressourcen identifiziert. Das erste Attribut ist die Ermöglichung des Ressourcenschutzes (DP-122411). Ziel muss es sein, alle verwendeten Ressourcen so umzuwandeln, dass eine Schließung des Recyclingkreislaufs erreicht werden kann und eine einfache Wieder- bzw. Weiterverwendung der Output-Ressourcen realisierbar ist. Auch für die Nachprozesse ist ein verbrauchsarmer Abtransport, eine verbrauchsarme Trennung sowie Entsorgung anzustreben (DP-122412). Das letzte

Ressourceneffizienz-Kriterium betrifft den Umweltschutz. Hier soll das Schädigungspotential der Output-Ressourcen und deren Nachprozesse für Mensch und Umwelt gering gehalten werden (DP-122421).

### 5.3.1.3 Einflussanalyse

Im Rahmen einer Analyse der FR- und der DP-Hierarchie zeigt sich, dass die aufgestellten Anforderungen bzw. Gestaltungsparameter weitgehend unabhängig voneinander sind<sup>27</sup>. Lediglich auf der untersten Hierarchieebene existieren zusätzliche Beziehungen der DPs zu FRs. Diese Zusammenhänge sind allerdings ausschließlich auf mögliche Recyclingkreisläufe zurückzuführen und werden kurz erläutert.

Zum einen hat der Einsatz von Input-Ressourcen mit ressourcenschonender Zusammensetzung (DP-122212), welche einen hohen Anteil an sekundären Ressourcen aufweisen, eine Auswirkung auf die Minimierung des Ressourcenverzehr für Vorprozesse (FR-122213). Der Grund hierfür ist, dass bei sekundären Ressourcen meist einige Vorprozesse, z. B. die Gewinnung, entfallen können. Somit ist beim Recycling i. d. R. ein verminderter Ressourcenverbrauch der Vorprozesse zu erwarten. Der Gestaltungsparameter DP-122411 zielt darauf ab, eine möglichst hohe und einfache Recyclingfähigkeit der Output-Ressourcen zu erreichen. Diese hat einerseits Einfluss auf die Möglichkeit Recyclingstoffe in großen Mengen einzusetzen (FR-122212). Andererseits ist dies eng mit der Minimierung des Ressourcenverzehr für Nachprozesse (FR- 122412) verknüpft, denn auch hier können unter Umständen durch das Recycling Nachprozesse, wie z. B. die Entsorgung, entfallen. Die letzte Beziehung ist die von Gestaltungsparameter DP-122412 und Anforderung FR-122213. Sie repräsentiert die Schließung des Recyclingkreislaufs. Somit führen verbrauchsarme Nachprozesse, die beim Recycling oft in großen Teilen mit den Vorprozessen gleichzusetzen sind, zu einem gesamthaft geringen Ressourcenverbrauch.

Aus den oben ausgeführten Zusammenhängen wird deutlich, dass es Abhängigkeiten zwischen den Ressourceneffizienz-Kriterien gibt, die sich jedoch auf die Wieder- bzw. Weiterverwendung von Ressourcen beschränken. Da bei der Modellierung in Kapitel 4 streng auf eine klare Abgrenzung von Input- und Output-Ressourcen geachtet wurde, müssen diese Zusammenhänge nicht weiter beachtet werden.

---

<sup>27</sup> Auf die Darstellung der Designmatrix wird an dieser Stelle verzichtet, da die relevanten Erkenntnisse in den folgenden Ausführungen zusammengefasst sind.

### 5.3.2 Operationalisierung der Kriterien

Die Bestandteile von Gleichung (3.6) und Gleichung (3.7) zur Berechnung der Kennzahlen für die Ressourceneffizienz im weiteren Sinne, d. h. die Ressourcenströme  $r_{in j}$  bzw.  $r_{out j}$  und die Ressourcenfaktoren  $\omega_{in j}$  bzw.  $\omega_{out j}$  sowie die ermittelten Ressourceneffizienz-Kriterien werden einander in Tabelle 6 gegenübergestellt. Dabei wird der Bestandteil der Gleichungen markiert, der das aufgelistete Ressourceneffizienz-Kriterium wiedergibt, wodurch verdeutlicht wird, welche der Ressourceneffizienz-Kriterien sich in den Ressourcenfaktoren widerspiegeln müssen. Im Folgenden werden nur noch diejenigen Ressourceneffizienz-Kriterien behandelt, welche für die Bestimmung der Ressourcenfaktoren  $\omega_{in j}$  bzw.  $\omega_{out j}$  relevant sind.

Tabelle 6: Ansatzpunkte für die Operationalisierung der Ressourceneffizienz-Kriterien

Ressourceneffizienz-Kriterium	Bestandteile der Kennzahlen			
	$r_{in j}$	$r_{out j}$	$\omega_{in j}$	$\omega_{out j}$
Quantität der Input-Ressource	●	○	○	○
Quantität der Output-Ressource	○	●	○	○
Charakter der Input-Ressource				
Nachhaltige Verfügbarkeit	○	○	●	○
Ressourcenschonende Zusammensetzung	○	○	●	○
Verbrauchsarme(r) Gewinnung, Veredelung, Antransport	○	○	●	○
Geringes Schädigungspotential (Input-Ressource/Vorprozesse)	○	○	●	○
Charakter der Output-Ressource				
Ermöglichung der Ressourcenschonung	○	○	○	●
Verbrauchsarme(r) Abtransport, Trennung, Entsorgung	○	○	○	●
Geringes Schädigungspotential (Output-Ressource/Nachprozesse)	○	○	○	●

Die identifizierten Ressourceneffizienz-Kriterien weisen allerdings weiterhin einen zu hohen Abstraktionsgrad für den Einsatz in der Bewertung auf und müssen daher konkretisiert werden. Dieser Schritt, bei dem die Kriterien über eine schrittweise Zerlegung auf messbare Unterkriterien bzw. Attribute zurückgeführt werden, wird auch Operationalisierung genannt (vgl. SCHNEEWEISS (1991, S. 28 ff.)). Diese messbaren Attribute entsprechen im Rahmen der Ressourceneffizienz zu großen Teilen den Wirkungsindikatoren der naturwissenschaftlich orientierten Bewertungsansätze oder anderen bereits existierenden quantitativen Indikatoren. Tabelle 7 und Tabelle 8 zeigen eine mögliche Zuordnung von messbaren Attributen zu den dazugehörigen Ressourceneffizienz-Kriterien.

### 5.3 Identifikation der Ressourceneffizienz-Kriterien

Tabelle 7: Mögliche Operationalisierung der Ressourceneffizienz-Kriterien für Input-Ressourcen

DP	Ressourceneffizienz-Kriterien		Attribut	Einheit
122211	Nachhaltige Verfügbarkeit	physische Verfügbarkeit	statische Reservenreichweite	a
		wirtschaftliche Verfügbarkeit	Importanteil Durchschnitt der Worldwide Governance Indicators (WGI) Herfindahl-Index	% - -
122212	Ressourcenschonende Zusammensetzung		Recyclinganteil	%
122213	Verbrauchsarme(r) Gewinnung, Veredelung, Antransport	verbrauchsarme Gewinnung und Veredelung	kumulierter Energieaufwand (KEA) abiotische Materialintensität (MI) virtuelles Wasser	MJ kg kg
		verbrauchsarmer Antransport	kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ
122221	Geringes Schädigungspotential		Ökotoxizität	1,4-DCB-Äqu.
			Humantoxizität	1,4-DCB-Äqu.

Tabelle 8: Mögliche Operationalisierung der Ressourceneffizienz-Kriterien für Output-Ressourcen

DP	Ressourceneffizienz-Kriterien		Attribut	Einheit
122411	Ermöglichung der Ressourcenschonung		recyclingfähiger Anteil	%
122412	Verbrauchsarme(r) Abtransport, Trennung, Entsorgung	verbrauchsarmer Abtransport	kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ
		verbrauchsarme Trennung und Entsorgung	kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ
122421	Geringes Schädigungspotential	geringes Schädigungspotential für den Menschen	akute orale Toxizität	Skala 0-5
			Inhalationstoxizität Hautreizung	Skala 0-5 Skala 0-5
		geringes Schädigungspotential für die Umwelt	Wassergefährdungsklasse biologische Abbaubarkeit	Skala 0-3 Skala 0-5

## 5.4 Bestimmung der charakteristischen Ressourcenfaktoren

### 5.4.1 Anforderungen und Ableitung des methodischen Themenfelds

Basierend auf den Einschränkungen der beschriebenen Bewertungsaufgabe, können für die Bestimmung der charakteristischen Ressourcenfaktoren ausschließlich Methoden der MADM-Verfahrensklasse herangezogen werden. Die Verfahren des MADM werden daher weiter untergliedert und im einzelnen aufgeführt, um schließlich die geeigneten Verfahren zu identifizieren. Ein Großteil der MADM-Verfahren wird in Abbildung 49 entsprechend der informationsorientierten Gliederung nach HWANG & YOON (1981) aufgeführt<sup>28</sup>. Hierbei werden folgende Fälle unterschieden:

- Es sind keine (Präferenz-)Informationen zu Kriterien oder Alternativen vorhanden.
- Es liegen (Präferenz-)Informationen zu den Kriterien vor.
- Es sind (Präferenz-)Informationen zu den Alternativen gegeben.

Bei den *Verfahren ohne Informationen* handelt es sich um Ansätze, bei denen die Wichtigkeit aller Kriterien als gleich angenommen wird. Dabei wird kein aussagekräftiges Ranking vorgenommen. Stattdessen erfolgt eine Vorauswahl besonders dominanter, gemäßiger oder vielversprechender Alternativen. Da eine bloße Vorauswahl der Ableitung eines Ressourcenfaktors nicht gerecht wird, sind diese Verfahren für die vorliegende Aufgabe nicht geeignet.

Eine weitere Gruppe stellen die *Verfahren mit Informationen zu Kriterien* dar. Diese werden weiter in Verfahren mit Anspruchsniveau, ordinalen Informationen, kardinalen Informationen und Substitutionsraten eingeteilt. Anspruchsniveaus sind Grenz- bzw. Schwellenwerte für die Ausprägungen der Kriterien, welche nicht über- bzw. unterschritten werden dürfen. Auf diese Weise kann eine Vorauswahl zwischen akzeptablen und nicht akzeptablen Alternativen getroffen werden (GÖTZE 2008, S. 179). Bei ordinalen Informationen wird die relative Wichtigkeit eines Kriteriums auf einer Ordinalskala<sup>29</sup> angegeben. Somit ist es möglich eine Bedeutungsreihenfolge der Kriterien zu erstellen. Eine Zuordnung

---

<sup>28</sup> Ausführungen zu den in Abbildung 49 aufgeführten Verfahren finden sich beispielsweise bei HWANG & YOON (1981), SCHNEEWEISS (1991) oder GÖTZE (2008).

<sup>29</sup> Da Attribute sowohl mathematischen als auch textuellen oder graphischen Charakter besitzen können, kommen bei der Ausprägungsmessung verschiedene Skalentypen zum Einsatz. Die Ordinalskala lässt vergleichende Aussagen über deren Rangordnung zu, wie beispielsweise größer oder kleiner. Es sind jedoch keine quantitative Differenzaussagen möglich, wodurch allein der qualitative Vergleich im Vordergrund steht. Sind hingegen quantitative Aussagen über die Abstände der Attributausprägungen möglich, so handelt es sich um eine Kardinalskala (SCHNEEWEISS 1991, S. 40 ff.).

der quantitativen Bedeutung eines Kriteriums kann auf Basis ordinaler Informationen nicht erfolgen. Sowohl die Verfahren mit Anspruchsniveau als auch die Verfahren mit ordinalen Informationen werden aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen, da mithilfe von Anspruchsniveaus und ordinalen Informationen keine quantitative Gewichtung der Kriterien und damit auch keine Ableitung eines quantitativen Ressourcenfaktors vorgenommen werden kann<sup>30</sup>.

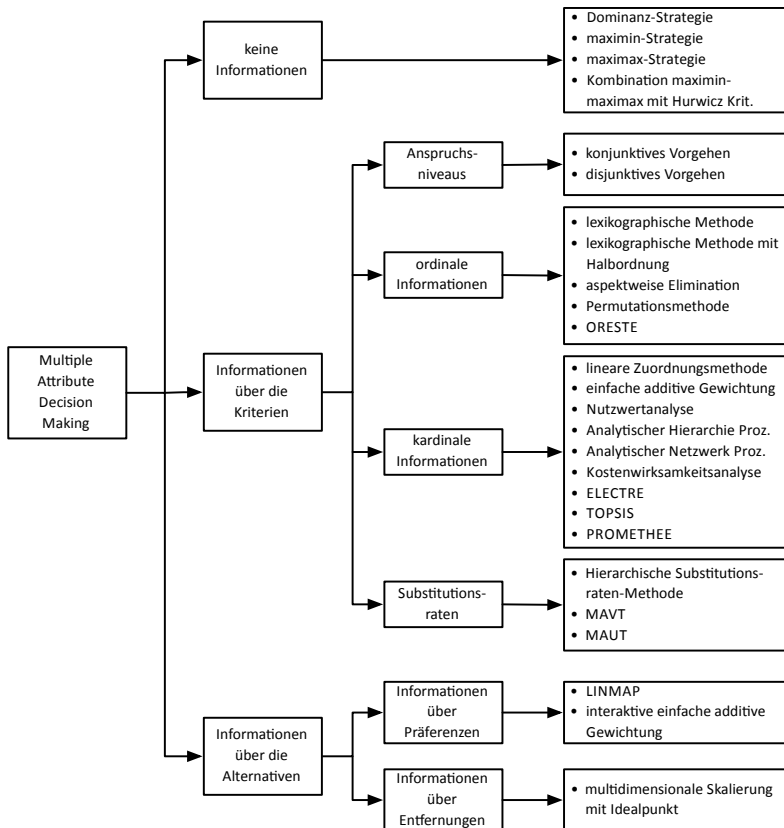


Abbildung 49: Klassifikation der MADM-Verfahren in Anlehnung an HWANG & YOON (1981, S. 9)

<sup>30</sup> An dieser Stelle ist ergänzend anzumerken, dass bei der Bewertung von Fertigungsprozessketten eine Vorauswahl über Schwellenwerte zur Einhaltung von ökologischen Mindeststandards durchaus sinnvoll sein kann.

Bei Verfahren mit kardinalen Informationen über die Wichtigkeit der Kriterien können diese, je nach Präferenz des Entscheidungsträgers, auf einer Kardinalskala angeordnet und gewichtet werden. Die Verfahren mit Substitutionsraten nutzen ebensolche anstelle der Gewichte. Dadurch wird die Bedeutung des jeweiligen Kriteriums über dessen Kompensierbarkeit durch andere Kriterien festgelegt. Die Substitutionsraten geben Auskunft darüber, auf wie viele Einheiten eines Kriteriums ein Entscheidungsträger verzichten würde, um eine Einheit eines anderen Kriteriums zu erhalten (HWANG & YOON 1981, S. 143). Eine ausführliche Analyse der Eigenschaften der Verfahren mit kardinalen Informationen und der Verfahren mit Substitutionsraten findet sich im Anhang A.

Liegen *Informationen über Alternativen* vor, so kann zwischen Verfahren mit Informationen über Präferenzen zum einen und Verfahren mit Informationen über Entfernungen zum anderen unterschieden werden. Erstere nutzen Paarvergleiche, um Präferenzurteile bezüglich der Alternativen zu gewinnen. Bei Verfahren mit Informationen über Entfernungen werden die Entfernungen in einem mehrdimensionalen Raum zwischen den vorliegenden Alternativen sowie zwischen einer idealen Alternative und den gegebenen Alternativen identifiziert (GÖTZE 2008, S. 180).

Da für Ressourcen i. d. R. kardinale Informationen zu den einzelnen Kriterien vorliegen, bieten sich Verfahren der entsprechenden Gruppe für die Bestimmung des Ressourcenfaktors an. Als besonders geeignet erweisen sich die Eigenvektormethode des Analytic Hierarchy Process (AHP) nach SAATY (1990) zur Bestimmung der Artenpräferenz und die Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) nach HWANG & YOON (1981) für die Ermittlung der Höhenpräferenz und die Aggregation. Die dieser Auswahl zugrunde liegende Analyse der Verfahren mit Informationen zu den Kriterien wird in Anhang A dargelegt.

### 5.4.2 Überblick über das Vorgehen

Alle in Abschnitt 5.2.4 vorgestellten Bestandteile des Vorgehens zur Bestimmung der Ressourcenfaktoren sind nun bekannt (vgl. Abbildung 50). Die Grundstruktur der Kriterienhierarchie wird mithilfe des AD abgeleitet. Dabei werden die Ressourceneffizienz-Kriterien einerseits für Input-Ressourcen und andererseits für Output-Ressourcen aufgestellt. Darauf aufbauend werden mithilfe der Eigenvektormethode des AHP die Gewichte der einzelnen Ressourceneffizienz-Kriterien, d. h. die Artenpräferenz, bestimmt. Über einen angepassten TOPSIS-Ansatz werden die Ausprägungen der Ressourcen normiert und bewertet, was der Ermittlung der Höhenpräferenz entspricht. Schließlich können die Gewichte der Kriterien und die Ausprägungen der Ressourcen bezüglich der Kriterien im Rahmen von TOPSIS aggregiert und die Ressourcenfaktoren abgeleitet werden.



Der erste Schritt aus Abbildung 50 wurde bereits in Abschnitt 5.3 behandelt. Schritt 2 wird in Abschnitt 5.4.3 erläutert und die Schritte 3a und 3b werden in Abschnitt 5.4.4 näher beschrieben.

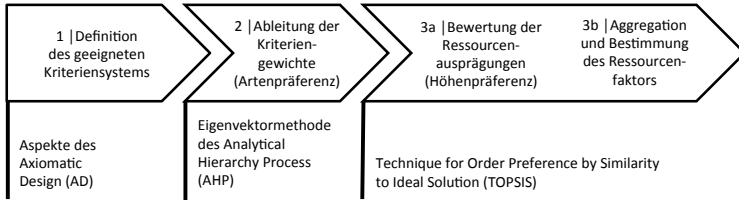


Abbildung 50: Darstellung der Methode zur Bestimmung der Ressourcenfaktoren

### 5.4.3 Gewichtung der Kriterien (Artenpräferenz)

Im Anschluss an die Definition der Kriterienhierarchie (Schritt 1 in Abbildung 50) erfolgt die Ableitung der Gewichte der einzelnen Kriterien (Schritt 2 in Abbildung 50). Als die geeignetste Methode zur Gewichtung einer solchen Kriterienstruktur wird die Eigenvektormethode, die im Rahmen des AHP von SAATY (1990) entwickelt wurde, herangezogen. Um die relative Wichtigkeit der einzelnen Kriterien einer Ebene in Bezug auf deren übergeordnetes Zielkriterium methodisch abzuleiten, erfolgt zunächst ein paarweiser Vergleich dieser Kriterien. Im Rahmen des paarweisen Vergleichs werden die Unternehmenspräferenzen zum Ausdruck gebracht. Die Angaben zur relativen Wichtigkeit der Kriterien werden in einer sogenannten Paarvergleichsmatrix  $A$  zusammengefasst. Die Präferenzen werden mithilfe der 9-Punkte-Skala nach SAATY (1990, S. 54) angegeben, welche in Tabelle 9 dargestellt ist. Auf diese Weise werden für alle Kriterien, die weitere Unterkriterien haben, entsprechende Matrizen erstellt. Ein Vorteil dieses Vorgehens ist, dass der Entscheider jeweils nur zwei Kriterien relativ zueinander vergleichen muss, was dem Menschen i. d. R. leichter fällt als seine Präferenzen absolut zu äußern (SAATY 2005, S. 349). Gleichzeitig werden sehr viele Informationen zu den Präferenzen des Entscheiders generiert, die anschließend für die Ableitung der absoluten Präferenzen in Form von Prioritäten- bzw. Gewichtungsvektoren genutzt werden können.  $a_{kl}$  ist das relative Gewicht des Kriteriums  $k$  im Vergleich zu Kriterium  $l$ . Die Paarvergleichsmatrix  $A$  mit  $n$  Kriterien im Vergleich und den Elementen  $\{a_{kl} \mid k, l \in \mathbb{N}\} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  hat folgende Form:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Tabelle 9: 9-Punkte-Skala in Anlehnung an SAATY (1990, S. 54)

Wichtigkeit <sup>31</sup>	Definition	Erklärung
1	gleich wichtig	Beide Kriterien haben dieselbe Wichtigkeit in Bezug auf deren übergeordnetes Kriterium.
3	etwas wichtiger	Erfahrung und Beurteilung favorisieren ein Kriterium leicht gegenüber dem anderen.
5	essenzielle oder starke Wichtigkeit	Erfahrung und Beurteilung favorisieren ein Kriterium stark gegenüber dem anderen.
7	sehr starke oder demonstrative Wichtigkeit	Ein Kriterium wird dem anderen sehr stark vorgezogen.
9	absolute Wichtigkeit	Ein Kriterium wird dem anderen absolut vorgezogen.
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	Bei Kompromissbedarf nutzen.

Da die untere Dreiecksmatrix dem umgekehrten Vergleich der Kriterien entspricht, müssen dort jeweils die reziproken Werte angegeben werden. Im vorliegenden Fall sind die absoluten Gewichte nur implizit gegeben. Wäre hingegen die absolute Wichtigkeit  $w_k$  für jedes Kriterium  $k$  explizit gegeben, so gälte  $a_{kl} = \frac{w_k}{w_l}$  und die Paarvergleichsmatrix  $A$  wäre damit folgendermaßen darstellbar:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \cdots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \cdots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \cdots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix}$$

Für den idealen Fall gilt daher:

$$w_k = a_{kl} \cdot w_l$$

Wird die Paarvergleichsmatrix mit dem Vektor  $w$ , der die absoluten Angaben zur Wichtigkeit der Kriterien enthält, multipliziert, gilt folgender Ausdruck:

$$A \cdot w = n \cdot w \quad (5.1)$$

<sup>31</sup> Eine ausführliche Erklärung zu den Vorzügen und der Eignung der 9-Punkte-Skala für den paarweisen Vergleich findet sich in SAATY (1990, S. 55 ff.).

Dieser Ausdruck entspricht der Definition des Eigenvektors  $\mathbf{w}$  der Matrix  $\mathbf{A}$  zum Eigenwert  $n$ . Wenn die Diagonale einer Matrix nur mit Einsen besetzt ist, d. h.  $\forall k$  ist  $a_{kk} = 1$ , so gilt:

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k = n$$

Entsprechend Gleichung (5.1) hätte die Matrix  $\mathbf{A}$  nur einen Eigenwert  $\lambda = n$ . Bei der realen Anwendung des paarweisen Vergleichs werden die Angaben jedoch nicht exakt den Verhältnissen der absoluten Wichtigkeit entsprechen, daher ist der gesuchte Eigenvektor derjenige, der zum maximalen Eigenwert  $\lambda_{max}$  gehört, der sogenannte prinzipale Eigenvektor. Die Berechnung der Eigenwerte und damit auch  $\lambda_{max}$  von  $\mathbf{A}$  entspricht der Lösung folgender Gleichung (die Nullstellen des charakteristischen Polynoms von  $\mathbf{A}$ ), wobei  $\mathbf{E}$  die Einheitsmatrix ist:

$$\det|\mathbf{A} - \lambda \cdot \mathbf{E}| = 0$$

Der gesuchte Eigenvektor  $\mathbf{w}$  ergibt sich wiederum aus dem folgenden homogenen linearen Gleichungssystem:

$$(\mathbf{A} - \lambda_{max} \cdot \mathbf{E}) \cdot \mathbf{w} = \mathbf{0}$$

Anschließend wird dieser Eigenvektor normiert, so dass gilt:

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1$$

Damit ist das *lokale Gewicht*  $w_k$ , d. h. die Wichtigkeit eines Kriteriums  $k$  in Bezug auf sein übergeordnetes Kriterium identifiziert. Um das *globale Gewicht*  $c_k$  für ein Kriterium  $k$  zu bestimmen, werden die lokalen Gewichte der Kriterien über die Hierarchieebenen hinweg miteinander multipliziert. Die globalen Gewichte werden sowohl für die Kriterienhierarchie der Input-Ressourcen als auch für die der Output-Ressourcen ermittelt.

Da, wie bereits erwähnt, die realen Angaben in der Paarvergleichsmatrix nicht exakt den unterstellten Quotienten aus Gewichten entsprechen, liegt eine gewisse Inkonsistenz bei den Angaben des paarweisen Vergleichs vor. Die Konsistenz einer positiven reziproken Matrix  $\mathbf{A}$  lässt sich mithilfe der normierten Abweichung ihres maximalen Eigenwerts von ihrem Rang  $n$  bestimmen. Der Konsistenzindex (engl.: Consistency Index (CI)) ist wie folgt definiert (SAATY 1990, S. 21):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

SAATY (1990, S. 21) gibt als Durchschnittswerte des CI für unterschiedliche Matrixdimensionen  $n$  einen Vergleichswert, den Random Index (RI) an. Über diesen lässt sich schließlich der Konsistenzratio (engl.: Consistency Ratio (CR)) als von SAATY festgelegtes Maß der Konsistenz einer Matrix wie folgt berechnen:

$$\text{CR} = \frac{\text{CI}}{\text{RI}}$$

Ist  $\text{CR} \leq 0,1$ , so sind die Angaben auf einem akzeptablen Konsistenzniveau (SAATY 1990, S. 21). Ist  $\text{CR} > 0,1$ , so sollten die Angaben nochmals überprüft und ggf. angepasst werden, bis die Konsistenzbedingung erfüllt ist.

#### 5.4.4 Bewertung der Ressourcen (Höhenpräferenz) und Ermittlung des Ressourcenfaktors

Für die Bewertung der Ressourcenausprägungen (Schritt 3a in Abbildung 50) und die Ermittlung des Ressourcenfaktors (Schritt 3b in Abbildung 50) wird die TOPSIS-Methode nach HWANG & YOON (1981, S. 128 ff.) herangezogen und leicht angepasst. Diese basiert auf dem Ansatz, dass die beste Alternative den geringsten Abstand zur idealen Lösung und gleichzeitig den größten Abstand zur anti-idealen Lösung hat. Die ideale Lösung setzt sich aus den bestmöglichen Ausprägungen bezüglich aller Kriterien zusammen. Analog vereinigt die anti-ideale Lösung alle schlechtesten Ausprägungen. Im vorliegenden Fall entsprechen die Ressourcen  $j$  den Alternativen.

Als Eingangsdaten erhält TOPSIS die sogenannte Entscheidungsmatrix  $\mathbf{D}^{32}$ , die aus den Elementen  $\{x_{jk} \mid j, k \in \mathbb{N}\} \in \mathbb{R}^{m \times n}$  besteht, die den Ausprägungen der  $m$  Ressourcen in Bezug auf die  $n$  Kriterien entsprechen. TOPSIS setzt voraus, dass jedes Kriterium  $k$  entweder einen monoton steigenden oder einen monoton fallenden Nutzen aufweist. Da unterschiedliche Kriterienhierarchien für Input- und Output-Ressourcen festgelegt wurden, liegt initial jeweils eine Entscheidungsmatrix für Input- und eine für Output-Ressourcen vor und auch die folgenden Schritte zur Bestimmung des Ressourcenfaktors müssen sowohl für Input- als auch für Output-Ressourcen durchgeführt werden. Zunächst wird die ideale Ressource  $A^+$  als diejenige definiert, die die beste Ausprägung für jedes Kriterium in sich vereinigt. Analog weist die anti-ideale Ressource  $A^-$  die jeweils schlechtesten Ausprägungen auf:

$$\begin{aligned} A^+ &:= \{x_1^+, x_2^+, \dots, x_k^+, \dots, x_n^+\} \\ A^- &:= \{x_1^-, x_2^-, \dots, x_k^-, \dots, x_n^-\} \end{aligned}$$

---

<sup>32</sup> Wird der Ressourcenfaktor einer einzigen Ressource berechnet, so entspricht  $\mathbf{D}$  einem Zeilenvektor.

Darauf aufbauend findet eine Normierung der Entscheidungsmatrix statt, bei der die Einträge der Matrix, die je nach Kriterium unterschiedliche Einheiten aufweisen, in dimensionslose Werte überführt werden. Dies ermöglicht eine anschließende Vergleichbarkeit der Kriterien, welche für die weiteren Berechnungen notwendig ist. Die Normierung erfolgt über eine lineare Skalentransformation. Hierzu werden die beste und schlechteste Ausprägung,  $x_k^+$  bzw.  $x_k^-$ , verwendet, die zuvor in Form der idealen Ressource und der anti-idealien Ressource für jedes Kriterium definiert wurden. Die Elemente der normierten Entscheidungsmatrix  $L$  berechnen sich demnach wie folgt:

$$l_{jk} = \frac{x_{jk} - x_k^-}{x_k^+ - x_k^-}$$

Anschließend werden die Elemente der normalisierten Entscheidungsmatrix mit den entsprechenden globalen Kriteriengewichten  $c_k$  multipliziert, die zuvor über die Eigenwertmethode bestimmt wurden (vgl. Abschnitt 5.4.3). Das Produkt entspricht der gewichteten normierten Entscheidungsmatrix  $U$  mit den Elementen:

$$u_{jk} = l_{jk} \cdot c_k$$

Darauf basierend ist es möglich den euklidischen Abstand einer Ressource zur idealen Ressource  $s^+$  und zur anti-idealien Ressource  $s^-$  wie folgt zu berechnen (HWANG & YOON 1981, S. 132):

$$s_j^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^n (u_{jk} - u_k^+)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$s_j^- = \sqrt{\sum_{k=1}^n (u_{jk} - u_k^-)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

Der Ressourcenfaktor  $\omega_j$  entspricht schließlich dem relativen Abstand der Ressource  $j$  zur idealen Ressource:

$$\omega_j := \frac{s_j^+}{s_j^- + s_j^+}$$

Damit liegt der Ressourcenfaktor immer zwischen 0 und 1 und zwar so, dass eine wenig schädliche Ressource einen möglichst geringen (nahe 0) und eine schädliche Ressource einen möglichst hohen Wert (nahe 1) besitzt. Die Berechnung der Ressourcenfaktoren  $\omega_{in j}$  und  $\omega_{out j}$  erfolgt getrennt für die Input- und Output-Ressourcen.

Der hier vorgestellte Ansatz unterscheidet sich bei der Normierung, der Definition der idealen und der anti-idealen Alternative sowie der Berechnung des relativen Abstands von der ursprünglich entwickelten Methode nach HWANG & YOON (1981). Grundsätzlich spielt die Definition der besten und schlechtesten Ausprägung für jedes Kriterium eine zentrale Rolle für die Bestimmung des charakteristischen Ressourcenfaktors. Dies sollte daher im Vorfeld zur Berechnung der Höhenpräferenz stattfinden. Außerdem ist es sinnvoll, bereits bei der Definition der relevanten Kriterien (Schritt 1 in Abbildung 50) die jeweils beste und schlechteste Ausprägung anzugeben, sodass bei der Bestimmung der Höhenpräferenz auf diese Werte zurückgegriffen werden kann.

In der Praxis erweist sich die Zuordnung der Ausprägungen  $x_{jk}$  von Ressourcen bezüglich der einzelnen Kriterien und somit die Bestimmung der Höhenpräferenz als nicht trivial. Daher werden nachfolgend einige Prinzipien erläutert, die die Ausprägungsbestimmung in der Praxis unterstützen.

### 5.5 Prinzipien der Anwendung

#### 5.5.1 Schritte bei der Anwendung des Vorgehens

Bei der Anwendung des Verfahrens zur Bestimmung der Ressourcenfaktoren müssen entsprechend der obigen Ausführungen mehrere Schritte durchgeführt werden. Die Aktionen bei der Anwendung des Verfahrens sind in Abbildung 51 aufgeführt. Ergänzend zur Darstellung des gesamten Vorgehens werden in Abbildung 52 die erforderlichen Aktionen für die Bestimmung der globalen Gewichte der Ressourceneffizienz-Kriterien gezeigt. Hierbei kann für die Bestimmung der lokalen Gewichte in Abbildung 53 eine weiter detaillierte Beschreibung der notwendigen Aktionen angegeben werden, die den paarweisen Vergleich, die Ermittlung des prinzipialen Eigenwerts und -vektors sowie die Prüfung der Konsistenz beinhaltet.

In Bezug auf das gesamte Vorgehen kann zwischen einmaligen Aktionen und Aktionen, die für jede Ressource einzeln vorgenommen werden müssen, unterschieden werden (vgl. Abbildung 51). Es wird hierbei deutlich, dass die Ableitung der Zielhierarchie und die darauf aufbauende globale Gewichtung der Ressourceneffizienz-Kriterien nur ein einziges Mal und zentral für alle Bewertungen des Unternehmens erfolgen. Der Schritt der Ermittlung der Artenpräferenz bzw. der globalen Kriteriengewichte (vgl. Abschnitt 5.4.3) ist damit einmalig durchzuführen. Auch die Ausprägungen der idealen und anti-idealen Ressource jedes Kriteriums werden in dieser Phase initial festgelegt. Diese Zuweisung muss für neue Bewertungsfälle i. d. R. nicht wiederholt werden.

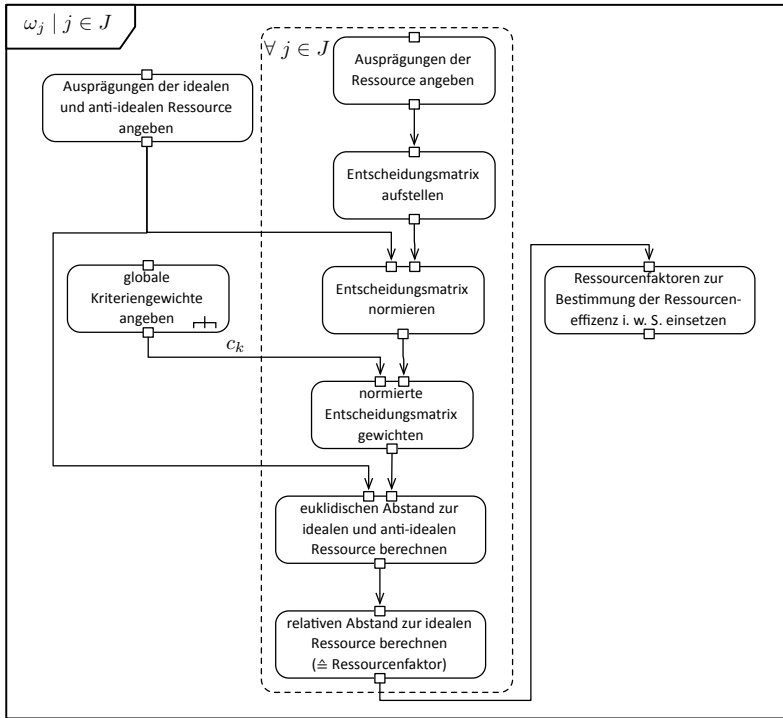


Abbildung 51: Erforderliche Aktionen bei der Anwendung des Vorgehens zur Bestimmung der Ressourcenfaktoren

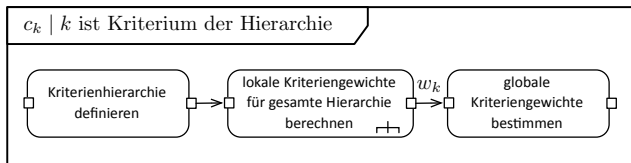


Abbildung 52: Schritte zur Bestimmung der globalen Kriteriengewichte

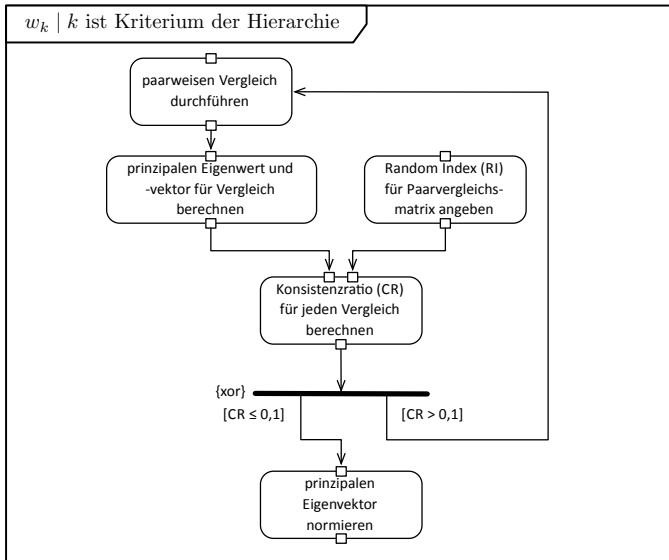


Abbildung 53: Ableitung der lokalen Kriteriengewichte

Wie dies auch in Abbildung 51 für die in einem sogenannten strukturierten Knoten gruppierten Aktionen ausgewiesen ist (dargestellt durch die gestrichelte Linie (FORBRIG 2007, S. 154 ff.)), erfolgt für jede Ressource eine Angabe der Ausprägungen und die Berechnung der Höhenpräferenz (vgl. Abschnitt 5.4.4). Auch die anschließende Bestimmung des charakteristischen Ressourcenfaktors als relativer euklidischer Abstand zur idealen Ressource wird für jede Ressource einzeln ausgeführt. Für den Fall, dass eine neue Ressource hinzugefügt wird, müssen diese Aktionen mit den entsprechenden Ausprägungen erneut durchlaufen werden.

### 5.5.2 Zuweisung der Ausprägungen

**Unsicherheit durch Datenquellen.** Verschiedene Datenquellen geben z. T. für die Ausprägung derselben Ressource bezüglich eines Kriteriums signifikant unterschiedliche Werte an. Dies ist grundsätzlich nachvollziehbar, da die Daten einer Quelle i. d. R. durch ein einheitliches Beurteilungsmuster ermittelt wurden. Verschiedenen Quellen hingegen liegen meist auch unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Datenermittlung zugrunde. Dieser Umstand resultiert darin, dass die Daten für die Bestimmung der Ressourcenfaktoren häufig mit einer Unsicherheit belegt sind, da viele Quellen nur Teile der benötigten



Informationen beinhalten, was dazu führt, dass verschiedene Quellen verwendet werden müssen. Die Angabe der Ausprägungen ist somit bei der Nutzung von Datensätzen aus unterschiedlichen Quellen schwierig.

Grundsätzlich sollte daher darauf geachtet werden, Quellen zu verwenden, welche möglichst vollständige oder zumindest vergleichbare Daten enthalten. Für die regelmäßige Anwendung ist eine breite Datenbasis zur Ausprägungsermittlung nötig, die von dem jeweiligen Unternehmen sukzessive geschaffen werden sollte. Zum Aufbau dieser Datenbasis müssen voraussichtlich mehrere Quellen herangezogen werden. Stark von der allgemeinen Tendenz abweichende Werte sind vor der Nutzung und Übertragung in die Datenbasis kritisch zu hinterfragen. Mittels der deskriptiven Statistik können Angaben über statistische Maßzahlen für die Ausprägungen erfolgen. Der zugehörige Mittelwert liefert unter der Voraussetzung einer grundsätzlich positiven Einschätzung der Quellen eine gute Näherung für die jeweilige Ausprägung in der deterministischen Rechnung.

**Relevanz der Kriterien.** Einige der Kriterien sind nicht für alle der verwendeten Ressourcen relevant. So ist beispielsweise die radioaktive Halbwertszeit nur für radioaktive Materialien von Bedeutung. Stehen eine radioaktive und eine nicht radioaktive Ressource im direkten Vergleich, so muss dem nicht radioaktiven Material die Ausprägung der idealen Alternative bzw. Ressource zugewiesen werden, um die schädigende Wirkung von radioaktivem Material weiterhin zu berücksichtigen und gleichzeitig eine einheitliche und vergleichbare Bewertung zu garantieren. Allgemein gilt: Ist ein Kriterium für eine Ressource nicht von Bedeutung, so ist dieser Ressource der Wert der idealen Ressource für das jeweilige Kriterium zuzuweisen.

**Unerschöpfliche Ressourcen.** Ein weiterer Aspekt, der bei der Zuordnung der Ausprägungen Beachtung finden muss, ist die Einstufung der unerschöpflichen Ressourcen. Sie sind als quasi unendlich hinsichtlich der Verfügbarkeit einzuordnen. Da der Wert  $\infty$  jedoch weder in den weiteren Schritten der Bestimmung des Ressourcenfaktors nutzbar noch für den menschlichen Geist vorstellbar ist, muss eine obere Schranke für die Verfügbarkeit der Ressourcen gewählt werden. Der Wert sollte so gewählt werden, dass dieser weiterhin die Ausprägung einer idealen Ressource repräsentiert und für das menschliche Verständnis fassbar bleibt.

**Komposite Ressourcen.** Im Falle einer zusammengesetzten Ressource (Komposit) stellt sich bei der Ausprägungsermittlung die Frage, ob ein Ressourcenanteil für die Bewertung maßgeblich ist oder ob eine aggregierte Bewertung

mit Berücksichtigung aller Anteile eine realitätsnähere Abbildung der Wirklichkeit darstellt. Die gewählte Konvention sollte für jedes Kriterium festgelegt werden.

Die auf den einzelnen Anteil bezogene Bewertung ist z. B. hinsichtlich der Verfügbarkeit von Ressourcen sinnvoll. Dabei ist derjenige Anteil am Kompositmaßgeblich, der für sich allein stehend die schlechteste Ausprägung besitzt. Grund hierfür ist, dass im Falle der Nicht-Verfügbarkeit des betrachteten Komposits die komplette komposite Ressource in dieser Form indisponibel wäre und eine Ersatzressource gefunden werden müsste. Da jedoch die Existenz einer Ersatzressource nicht garantiert werden kann, ist ein auf die kritischen Elemente fokussierter, pessimistischer Bewertungsansatz zu wählen.

**Aggregatzustände materieller Ressourcen.** Der Aggregatzustand ist insbesondere bei der Bestimmung der Ausprägung von materiellen Ressourcen wichtig und macht grundsätzlich eine Aussage über die vorliegende Struktur eines Stoffs. Mit dieser Kenntnis kann die Vielzahl der zu betrachtenden möglichen Umweltauswirkungen bei einer Bewertung erheblich reduziert werden.

Ein anschauliches Beispiel ist das Kohlendioxid. Wird es im gasförmigen Zustand in die Atmosphäre abgegeben, absorbiert Kohlendioxid die vom Boden abgegebene Infrarotstrahlung, emittiert sie anschließend wieder als atmosphärische Gegenstrahlung und trägt auf diese Weise zur globalen Erwärmung bei. Als Flüssigkeit oder Feststoff kann sich Kohlendioxid jedoch kaum in der Atmosphäre verteilen und zusätzliche Wärmestrahlung emittieren. Eine globale Erwärmung durch Kohlendioxid ist in dieser Form also nicht zu erwarten und somit für die entsprechenden Aggregatzustände nicht zu berücksichtigen.

## 6 Anwendung der Ressourceneffizienz-Bewertung

### 6.1 Allgemeines

Bei der Anwendung der Methode werden die in Kapitel 4 und Kapitel 5 detailliert vorgestellten Phasen der Bewertung der Ressourceneffizienz durchgeführt. Zunächst erfolgt hierfür eine Beschreibung des Produkts und der zu erzeugenden Features. Anschließend werden die im Rahmen der Technologieplanung festgelegten, alternativen Prozessketten modelliert und die auftretenden Ressourcenströme quantifiziert. Sobald bekannt ist, welche Input- und Output-Ressourcen verwendet werden, können, auf Basis der im Unternehmen zentral festgelegten Ressourceneffizienz-Kriterien und deren Gewichtung, die entsprechenden Ressourcenfaktoren abgeleitet werden. Schließlich erfolgt die Bewertung anhand der in Abschnitt 3.4.4 eingeführten Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz, die Anhaltspunkte für weitere Analysen bieten.

Im Rahmen dieses Kapitels wird zunächst ein Softwaretool vorgestellt, das die Bewertung und den Vergleich der Ressourceneffizienz alternativer Prozessketten unterstützt (vgl. Abschnitt 6.2). Anschließend erfolgt ein Prozesskettenvergleich aus dem Bereich der Fügetechnik, der den Einsatz der gesamten Methode im Rahmen einer exemplarischen Anwendung verdeutlicht (vgl. Abschnitt 6.3). Schließlich wird in Abschnitt 6.4 aufgezeigt, wie die entwickelte Methode die in Kapitel 3 gestellten Anforderungen erfüllt. Außerdem werden der notwendige Aufwand für die Datenbeschaffung und der auftretende Nutzen bei der Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung aufgeführt.

### 6.2 Umsetzung in dem Softwaretool *REvalue*

Bei der Durchführung einer vergleichenden Bewertung mit mehreren Prozessketten werden große Datenmengen generiert, was den Überblick erschwert und ggf. sogar zu Fehlern bei der Ermittlung der Ressourceneffizienz führen kann. Außerdem sind bei der Bestimmung der Ressourcenfaktoren Rechenoperationen notwendig, die nicht im Rahmen einer einfachen Tabellenkalkulation durchführbar sind. Um diesen Hemmnissen bei der Anwendung in der Praxis entgegenzuwirken, wurde das Softwaretool *REvalue* entwickelt, welches die Bewertungsmethode implementiert, den Nutzer durch die Eingabe leitet, die Daten verwaltet, die notwendigen Berechnungen durchführt und mögliche Inkonsistenzen vermeidet.

Das Softwaretool wurde in der Programmiersprache Java umgesetzt, um eine plattformunabhängige Anwendung zu garantieren. Die einfache Korrektur eventueller Fehler wird durch eine „log“-Datei ermöglicht, die mit dem aktuellen Datum und der Uhrzeit in einem Unterordner des Programmverzeichnisses angelegt wird und alle wichtigen Ereignisse mit Uhrzeit protokolliert. Um eine externe Bearbeitung zu ermöglichen, werden alle Daten eines Bewertungsfalls in einer separaten Datei im „csv“-Format gespeichert. Das Speichern und Laden erfolgt in diesem Dateiformat über mit Semikolons getrennte Werte, die einen Import in und Export aus der in Unternehmen gängigen Anwendung Microsoft® Office Excel® ermöglichen. Damit beim Speichern und Lesen der Daten keine Fehler auftreten, dürfen die Eingaben keine Semikolons enthalten. Zusätzlich können die allgemeinen Daten zu den Ressourcen in einer vom Bewertungsfall unabhängigen Datenbank abgelegt und damit auch für andere Vergleiche verfügbar gemacht werden. Um trotz der hohen Flexibilität bei der Eingabereihenfolge nicht den Überblick über fehlende und bereits angegebene Daten zu verlieren, wird der aktuelle Fortschrittsstatus mitgeführt, anhand dessen vollständig und unvollständig bearbeitete Modellteile identifiziert werden können. Das Softwaretool bietet zusätzlich vielfältige, graphisch unterstützte Auswertemöglichkeiten für eine Analyse der Ressourcenströme. Abbildung 54 zeigt beispielhaft die Oberfläche des Softwaretools REValue. In der folgenden Beschreibung des Anwendungsfalls wird auf weitere Darstellungen des Softwaretools verzichtet, um insbesondere die dahinter liegende Modellierung, die in Kapitel 4 theoretisch beschrieben wurde, zu veranschaulichen.

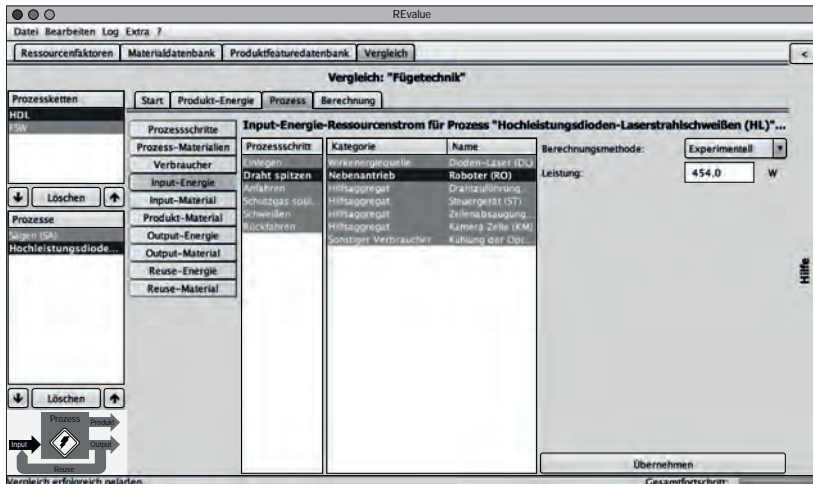


Abbildung 54: Screenshot des Softwaretools REValue

## 6.3 Exemplarische Anwendung in der Fügetechnik

### 6.3.1 Produktfeatures und Prozessketten

Als exemplarische Anwendung der vorgestellten Bewertungsmethode werden zwei alternative Prozessketten aus dem Bereich der Fügetechnik untersucht. Die Daten für die Quantifizierung der Ressourcenströme entstammen Messungen von Referenzprozessen (vgl. Anhang B.1). Die zu erfüllende Aufgabe ist die Fertigung eines kleinen Druckluftbehälters, wobei ein gerolltes Blechteil verbunden aus der Aluminiumlegierung EN AW 6060 mittels einer Längsnaht verbunden wird. Für diese Produktionsaufgabe werden das Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißen (HDL) und alternativ das Rührreibschweißen (engl.: friction stir welding (FSW)) eingesetzt. Mit einem Radius von etwa  $w_r = 120$  mm und der Länge von  $w_l = 300$  mm ergibt sich ein Behälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 13,5 l. Die Blechdicke und damit die Wandstärke des Druckluftbehälters beträgt  $w_d = 3$  mm (vgl. Abbildung 55).

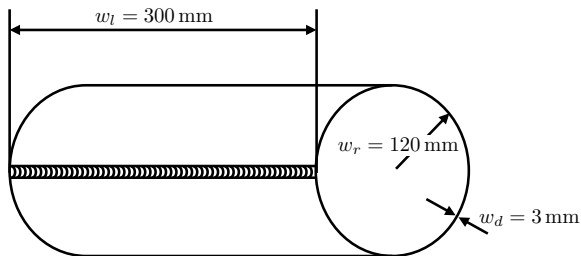


Abbildung 55: Darstellung des Werkstücks im Endzustand

Als zusätzlicher, dem Fügen vorgelagerter Prozess wird das Ablängen des Werkstoffs an einer Kreissäge gewählt. Von einem Blechstreifen mit einer Breite von 750 mm werden hierfür 300 mm lange Stücke abgesägt, wodurch sich final ein exakter Druckbehälterdurchmesser von 238,7 mm ergibt. Dieser Sägeprozess ist für beide Fügeprozesse identisch und wird nur zur Verdeutlichung der Modellierung ganzer Prozessketten in die Betrachtung integriert. Das Biegen der Bleche wird als weiterer, völlig übereinstimmender vorgelagerter Prozess in der jeweiligen Prozesskette nicht berücksichtigt, da dieser hinsichtlich der Ressourceneffizienz zu keiner weiteren Differenzierung führt und auch für die Verdeutlichung der Prozesskettenmodellierung keinen Mehrwert bringt. Als alternative Prozessketten ergeben sich damit:

1. Prozesskette HDL: Sägen und Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißen
2. Prozesskette FSW: Sägen und Rührreibschweißen

Die betrachteten Features sind bei dem vorliegenden Produkt das Subtrahieren der Geometrie  $f_{\text{subt}}$  durch den spanenden Sägeprozess und das Verbinden der Geometrie  $f_{\text{verb}}$  durch den jeweiligen Fügeprozess (vgl. Abbildung 43). Damit ergibt sich die Menge der Features zu:

$$F := \{f_{\text{subt}}, f_{\text{verb}}\}$$

Der Referenz-Energiebetrag für das Trennen wird je  $1 \text{ mm}^3$  abgetragenes Spanvolumen auf  $3 \text{ J}$  festgelegt ( $h_{\text{subt}} = 3 \text{ J mm}^{-3}$ ). Durch die Sägeblattbreite von  $3,2 \text{ mm}$  ergibt sich ein gesamtes Spanvolumen von  $d_{\text{subt}} = 7200 \text{ mm}^3$  je Bauteil. Das Feature für die Verbindung der Geometrie bezieht sich auf die vorliegende Fügefläche  $d_{\text{verb}} = 900 \text{ mm}^2$  und erhält einen Referenz-Energiebetrag von  $h_{\text{verb}} = 10 \text{ J mm}^{-2}$ . Die Referenz-Energiebeträge der Features wurden von Experten geschätzt. Die Mengen der Referenz-Energiebeträge und der Bezugsgrößen sind somit:

$$H := \{h_{\text{subt}} = 3 \text{ J mm}^{-3}, h_{\text{verb}} = 10 \text{ J mm}^{-2}\}$$

$$D := \{d_{\text{subt}} = 7200 \text{ mm}^3, d_{\text{verb}} = 900 \text{ mm}^2\}$$

Der Produkt-Ressourcenstrom bezieht sich auf die Ressource ‚elektrische Energie‘ (EN), da alle primären Prozesse mit dieser betrieben werden und daher auch die Wirkenergie elektrische Energie ist.  $r_{\text{pro EN}}$  ergibt sich daher zu:

$$\begin{aligned} r_{\text{pro EN}} &= h_{\text{subt}} \cdot d_{\text{subt}} + h_{\text{verb}} \cdot d_{\text{verb}} \\ &= 3 \text{ J mm}^{-3} \cdot 7200 \text{ mm}^3 + 10 \text{ J mm}^{-2} \cdot 900 \text{ mm}^2 \\ &= 30,6 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Die optimalen materiellen Produkt-Ressourcenströme ergeben gemeinsam die Masse des Produkts. Im vorliegenden Fall besteht das Produkt nur aus einer Ressource, der Aluminiumlegierung EN AW 6060 (AL) mit der Dichte  $\rho_{\text{AL}} = 2,946 \text{ g cm}^{-3}$ . Über die Angaben des zu fertigenden Druckluftbehälters lässt sich der Produkt-Ressourcenstrom  $r_{\text{pro AL}}$  wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} r_{\text{pro AL}} &= \frac{2,946 \text{ g cm}^{-3}}{1000 \text{ mm}^3 \text{ cm}^{-3}} \cdot 300 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm} \cdot 750 \text{ mm} \\ &= 1988,6 \text{ g} \end{aligned}$$

## 6.3.2 Modellierung und Quantifizierung

### 6.3.2.1 Prozesskette HDL

Die Prozesskette HDL  $k_{\text{HDL}}$  besteht aus den Prozessen Sägen (SA)  $p_{\text{SA}}$  und Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißen (HL)  $p_{\text{HL}}$ . Einen kurzen Überblick über die Prozesskette gibt Abbildung 56. Zunächst erfolgt die Modellierung und Quantifizierung des Prozesses Sägen und anschließend des Prozesses Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißen.

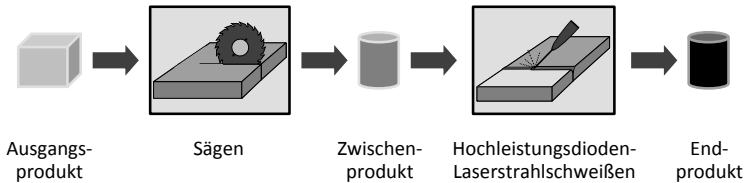


Abbildung 56: Veinfachte Darstellung der Fertigungsprozesskette HDL

**Prozess Sägen (SA).** Der Sägeprozess  $p_{\text{SA}}$  führt die entsprechende Technologie  $v_{\text{SA}}$  auf einer Säge  $b_{\text{Säge}}$  aus, um das Feature  $f_{\text{subt}}$  herzustellen. Das Betriebsmittel besteht aus Sicht der eingesetzten energetischen Ressourcen, welche ausschließlich die elektrische Energie umfassen, aus zwei Verbrauchern: der Spanabsaugung (SP) als Hilfsaggregat  $b_{\text{SP}} \mid \text{SP} \in I_{\text{BH}}$  und der Kreissäge (KS) als Wirkenergiequelle  $b_{\text{KS}} \mid \text{KS} \in I_{\text{BW}}$ . Die Spanabsaugung kann als Verbraucher nur ein- oder ausgeschaltet sein und weist somit die Zustandsmenge  $Z_{\text{SP}} = \{z_{\text{Aus}}, z_{\text{Ein}}\}$  auf. Die Zustandsmenge  $Z_{\text{KS}}$  der Kreissäge  $b_{\text{KS}}$  ist umfangreicher und lautet:  $Z_{\text{KS}} = \{z_{\text{Aus}}, z_{\text{Bereitschaft}}, z_{\text{Bearbeitung}}\}$ . Aus Messungen werden für die energetischen Input-Ressourcenflüsse der Verbraucher  $b_{\text{SP}}$  und  $b_{\text{KS}}$  folgende Zustands-Ressourcenfluss-Zeilenvektoren aufgestellt:

$$r'_{\text{in EN}}(\text{SP}) = (0 \text{ W} \quad 385 \text{ W})$$

$$r'_{\text{in EN}}(\text{KS}) = (0 \text{ W} \quad 85 \text{ W} \quad 950 \text{ W})$$

Für energetische Ressourcen werden keine Daten zu den Output-Ressourcenflüssen benötigt (vgl. Abschnitt 3.4.4). Als materieller Ressourcenstrom geht in die Säge ausschließlich die Aluminiumlegierung EN AW 6060 (AL) als Werkstoff ein ( $r_{\text{in AL}} \mid \text{AL} \in I_{\text{MW}}$ ). Die Masse des Input-Werkstoffstroms beträgt 2201,4 g. Außerdem verlassen die Säge 212,8 g der Aluminiumlegierung als  $r_{\text{out AL}} \mid \text{AL} \in I_{\text{MW}}$ , was den erzeugten Spänen bei einer Breite des Sägeblatts von 3,2 mm entspricht. Damit sind die relevanten

Elemente des Sägeprozesses beschrieben. Diese Werkstoffströme werden, wie in Abschnitt 4.3.3 erläutert, direkt angegeben und nicht über Arbeitszeiten und Ressourcenflüsse berechnet.

Der Prozess selbst besteht aus drei Prozessschritten und den entsprechenden Arbeitszeiten:

$$\begin{aligned} S_{SA} &= \{s_{\text{Coil einlegen}}, s_{\text{Sägen}}, s_{\text{Material fördern}}\} \\ T_{SA} &= \{t_{\text{Coil einlegen}}, t_{\text{Sägen}}, t_{\text{Material fördern}}\} \\ &= \{10 \text{ s}, 37,5 \text{ s}, 2 \text{ s}\} \end{aligned}$$

Hierbei gilt  $s_{\text{Coil einlegen}} \in I_{S_N}$ ,  $s_{\text{Sägen}} \in I_{S_H}$  und  $s_{\text{Material fördern}} \in I_{S_N}$ . Ein Reinigen der Kreissäge findet nach der eigentlichen Arbeitszeit im ausgeschalteten Zustand der Maschine statt und muss bei der ressourcenorientierten Modellierung nicht berücksichtigt werden. Die Zuordnung der Zustände der Verbraucher zu den Prozessschritten erfolgt über die Funktion  $\nu$ , welche in Tabelle 10 dargestellt ist.

Tabelle 10: Funktion  $\nu$  für die Zuordnung der Zustände der Verbraucher zu den Prozessschritten

	$s_{\text{Coil einlegen}}$	$s_{\text{Sägen}}$	$s_{\text{Material fördern}}$
$b_{SP}$	$z_{\text{Ein}}$	$z_{\text{Ein}}$	$z_{\text{Ein}}$
$b_{KS}$	$z_{\text{Bereitschaft}}$	$z_{\text{Bearbeitung}}$	$z_{\text{Bereitschaft}}$

Aufgrund der überschaubaren Anzahl an Ressourcen, wird von der Aufstellung der Ressourcenfluss-Prozessschritt-Matrizen abgesehen. Somit lassen sich mithilfe der Funktion  $\nu$ , der Arbeitszeiten und der für die Verbraucher angegebenen energetischen Ressourcenflüsse, direkt die Brutto-Input- und Brutto-Output-Ressourcenstrom-Vektoren bestimmen:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\text{in}}^{\text{SA}} &= \begin{pmatrix} r_{\text{in EN}}^{\text{SA}} \\ r_{\text{in AL}}^{\text{SA}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 55,7 \text{ kJ} \\ 2201,4 \text{ g} \end{pmatrix} \\ \mathbf{r}_{\text{out}}^{\text{SA}} &= (r_{\text{out AL}}^{\text{SA}}) = (212,8 \text{ g}) \end{aligned}$$

Nachdem keine Reuse-Ressourcenströme in der Prozesskette auftreten, entsprechen die Brutto-Ressourcenströme den Netto-Ressourcenströmen und für den Sägeprozess gilt:  $\mathbf{r}_{\text{in}}^{\text{SA}} := \underline{r}_{\text{in}}^{\text{SA}}$  und  $\mathbf{r}_{\text{out}}^{\text{SA}} := \underline{r}_{\text{out}}^{\text{SA}}$ .

**Prozess Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißen (HL).** Der Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißprozess  $p_{HL}$  führt die Füge-technologie



$v_{HL}$  auf einer Laseranlage  $b_{Anlage}$  aus, um das Feature  $f_{verb}$  herzustellen. Im vorliegenden Fall besteht die Laseranlage aus Sicht der elektrischen Energie als Ressource aus mehreren Verbrauchern (vgl. Abbildung 57):

- Wirkenergiequelle Dioden-Laser (DL)  $b_{DL} \mid DL \in I_{B_W}$
- Nebenantrieb Roboter (RO)  $b_{RO} \mid RO \in I_{B_N}$
- Hilfsaggregat Drahtzuführung (DZ)  $b_{DZ} \mid DZ \in I_{B_H}$
- Hilfsaggregat Steuergerät (ST)  $b_{ST} \mid ST \in I_{B_H}$
- Hilfsaggregat Zellenabsaugung (ZA)  $b_{ZA} \mid ZA \in I_{B_H}$
- Hilfsaggregat Kamera Zelle (KM)  $b_{KM} \mid KM \in I_{B_H}$
- Sonstiger Verbraucher Kühlung der Optik (KU)  $b_{KU} \mid KU \in I_{B_S}$

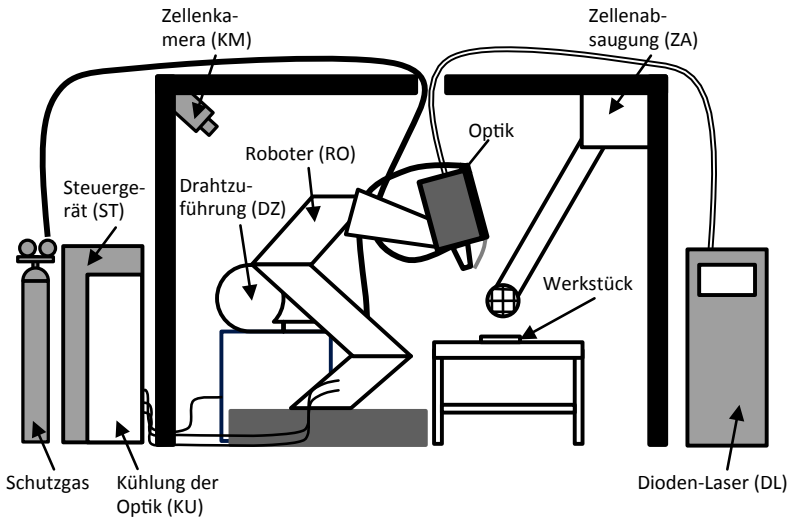


Abbildung 57: Aufbau und Komponenten der Anlage zur Durchführung des Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißprozesses

Wie bei dem oben beschriebenen Sägeprozess können zunächst die Zustände der einzelnen Verbraucher aufgenommen und den Prozessschritten des Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißprozesses zugeordnet werden. Aufgrund der Vielzahl an Verbrauchern wird davon an dieser Stelle jedoch zugunsten der komprimierten Beschreibung des Anwendungsfalls abgesehen und die energetischen Ressourcenflüsse werden direkt den Prozessschritten zugeordnet. Der

Prozessablauf beginnt mit dem Einlegen des Werkstücks in die Einspannvorrichtung<sup>33</sup> und dem anschließenden Anspitzen des Schweißdrahts. Nachdem die Zelle geschlossen wurde, fährt der Roboter die Ausgangsposition über dem Werkstück an und spült mit Schutzgas. Es folgt das Fügen mittels Laserstrahlschweißen. Nach dem Schweißvorgang fährt der Roboter abschließend seine Ruheposition an und der Prozess kann von vorne beginnen. Die Prozessschritte und deren entsprechende Arbeitszeiten sind:

$$\begin{aligned}
 s_{SA} &= \{s_{\text{Einlegen}}, s_{\text{Draht spitzen}}, s_{\text{Anfahren}}, s_{\text{Schutzgas spülen}}, s_{\text{Schweißen}}, \\
 &\quad s_{\text{Rückfahren}}\} \\
 t_{SA} &= \{t_{\text{Einlegen}}, t_{\text{Draht spitzen}}, t_{\text{Anfahren}}, t_{\text{Schutzgas spülen}}, t_{\text{Schweißen}}, \\
 &\quad t_{\text{Rückfahren}}\} \\
 &= \{30 \text{ s}, 2 \text{ s}, 1,4 \text{ s}, 1 \text{ s}, 6 \text{ s}, 2,2 \text{ s}\}
 \end{aligned}$$

Dabei sind  $s_{\text{Einlegen}} \in I_{S_N}$ ,  $s_{\text{Draht spitzen}} \in I_{S_N}$ ,  $s_{\text{Anfahren}} \in I_{S_N}$ ,  $s_{\text{Schutzgas spülen}} \in I_{S_N}$ ,  $s_{\text{Schweißen}} \in I_{S_H}$  und  $s_{\text{Rückfahren}} \in I_{S_N}$ . Für die Kühlung der Optik als sonstiger Verbraucher müssen einige zusätzliche Faktoren berücksichtigt werden, da i. d. R. auch andere Prozesse außerhalb der Prozesskette von demselben Kühlaggregat versorgt werden. Die Zustände des Kühlaggregats sind vom Prozess entkoppelt, da die Leistungsaufnahme der Kühlung ausschließlich mit der Temperatur des gemeinsamen Primärkreislaufs zusammenhängt und deshalb nur indirekt von den Zuständen des Hochleistungsdiolen-Laserstrahlschweißprozesses abhängig ist. Aus diesem Grund wird für die Leistungsaufnahme der Kühlung ein Mittelwert gebildet und über alle Zustände hinweg mit 800 W als konstant angenommen. Der Anteil des betrachteten Schweißprozesses am Gesamtverbrauch wird auf 30 % geschätzt. Dies ergibt eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 240 W für die Kühlung.

Während ‚Anfahren‘, ‚Schutzgas spülen‘ und ‚Rückfahren‘ hat die Laseranlage einen erhöhten Energiebedarf, da das laseraktive Medium bereits gepumpt wird und die entstehende Strahlung intern absorbiert wird. Dies ist notwendig, damit zu Beginn des Schweißens sofort die benötigte Leistung zur Verfügung steht. Die sich ergebenden Prozessschritt-Ressourcenfluss-Zeilenvektoren  $\mathbf{r}'_{\text{in EN}}$  für die elektrische Leistung jedes Verbrauchers sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

<sup>33</sup> Dieser Einspannvorgang beinhaltet auch das Entnehmen des vorherigen Bauteils.

Tabelle 11: Zuordnung der elektrischen Leistungen der Verbraucher zu den Prozessschritten

	Einlegen	Draht spitzen	Anfahren	Schutzgas spülen	Schweißen	Rückfahren
$b_{DL}$	650 W	650 W	2830 W	2830 W	19 630 W	2830 W
$b_{DZ}$	17 W	17 W	17 W	17 W	65 W	17 W
$b_{ST}$	1030 W	1030 W	1045 W	1045 W	1045 W	1045 W
$b_{RO}$	454 W	454 W	1420 W	1420 W	945 W	1620 W
$b_{KU}$	240 W	240 W	240 W	240 W	240 W	240 W
$b_{ZA}$	550 W	550 W	550 W	550 W	550 W	550 W
$b_{KM}$	5 W	5 W	5 W	5 W	5 W	5 W

Für den Prozess  $p_{HL}$  ergibt sich damit folgender Brutto-Input-Ressourcenflussvektor der elektrischen Leistung für die unterschiedlichen Prozessschritte:

$$\underline{r}_{in\ EN}^{HL} = (2946\ W \quad 2946\ W \quad 6107\ W \quad 6107\ W \quad 22\ 480\ W \quad 6307\ W)$$

Als materielle Ressourcen gehen in die Anlage der Schweißdraht (SD) als Hilfsstoff und das Schutzgas (SG) als Betriebsstoff ein. Das Aluminiumblech als Werkstück stellt in diesem Fall ein Zwischenprodukt dar und muss daher nicht berücksichtigt werden. Außerdem geht, im Gegensatz zu dem in Abschnitt 6.3.1 angegebenen optimalen Produkt-Ressourcenstrom, in diesem Prozess zusätzlich Schweißdraht in das Produkt ein. Der Schweißdraht besteht aus der Legierung AlSi12 und besitzt ein spezifisches Gewicht von  $2\ g\ m^{-1}$ . Beim Anspitzen des Drahts vor jedem Prozess werden durchschnittlich 3 mm Schweißdraht entfernt. Dies entspricht einer Masse von 0,006 g. Bezogen auf die Arbeitszeit des Prozessschritts von 2 s ergibt sich ein Ressourcenfluss von  $0,003\ g\ s^{-1}$ . Während des Schweißens wird der Draht mit  $2\ m\ min^{-1}$  zugeführt, was einem Ressourcenfluss von  $4\ g\ min^{-1}$  bzw.  $0,067\ g\ s^{-1}$  entspricht. Damit existiert folgender Brutto-Input-Ressourcenflussvektor für den Schweißdraht ( $\underline{r}_{in\ SD}^{HL} \mid SD \in I_{M_H}$ ) für die unterschiedlichen Prozessschritte:

$$\underline{r}_{in\ SD}^{HL} = (0\ g\ s^{-1} \quad 0,003\ g\ s^{-1} \quad 0\ g\ s^{-1} \quad 0\ g\ s^{-1} \quad 0,067\ g\ s^{-1} \quad 0\ g\ s^{-1})$$

Als Schutzgas wird bei dem vorliegenden Schweißprozess Argon verwendet, welches ein spezifisches Gewicht von  $1,782 \text{ g l}^{-1}$  besitzt. Sowohl beim Spülen des Schutzgases als auch beim Schweißen wird ein Volumenstrom von  $201 \text{ min}^{-1}$  verwendet. Dies ergibt für beide Zustände einen Ressourcenfluss von  $35,64 \text{ g min}^{-1}$  bzw.  $0,594 \text{ g s}^{-1}$ . Der Brutto-Input-Ressourcenfluss-Vektor des Schutzgases ( $\underline{r}_{\text{in SG}}^{\text{HL}} \mid \text{SG} \in I_{M_B}$ ) für die unterschiedlichen Prozessschritte lautet:

$$\underline{r}_{\text{in SG}}^{\text{HL}} = (0 \text{ g s}^{-1} \quad 0 \text{ g s}^{-1} \quad 0 \text{ g s}^{-1} \quad 0,594 \text{ g s}^{-1} \quad 0,594 \text{ g s}^{-1} \quad 0 \text{ g s}^{-1})$$

Zusammengefasst ergeben die aufgestellten Brutto-Input-Ressourcenfluss-Vektoren die Ressourcenfluss-Prozessschritt-Matrix für die Brutto-Input-Ressourcen  $\underline{R}_{\text{in}}^{\text{HL}} \in \underline{R}_{\text{in}}^{n \times k}$  des Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißprozesses. Die Dimension der Ressourcen ist entsprechend der beschriebenen Inputs  $n = 3$  und die Anzahl der Prozessschritte  $k = 6$ :

$$\underline{R}_{\text{in}}^{\text{HL}} = \begin{pmatrix} 2946 \text{ W} & 2946 \text{ W} & 6107 \text{ W} & 6107 \text{ W} & 22\,480 \text{ W} & 6307 \text{ W} \\ 0 \text{ g s}^{-1} & 0,003 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} & 0,067 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} \\ 0 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} & 0,594 \text{ g s}^{-1} & 0,594 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} \end{pmatrix}$$

Analog wird die Ressourcenfluss-Prozessschritt-Matrix für die Brutto-Output-Ressourcen  $\underline{R}_{\text{out}}^{\text{HL}} \in \underline{R}_{\text{in}}^{m \times k}$  des Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißprozesses aufgestellt. Da die energetischen Output-Ressourcenströme nicht benötigt werden, sind die Ressourcenflüsse auch nicht in der Matrix aufgeführt. Während des Schweißprozesses verdampfen ca. 10 % des aufgeschmolzenen Werkstoffs. Bei einer trapezförmigen Schweißnaht, einer Schweißnahtbreite von 3 mm und einer Schweißnahtwurzelbreite von 1 mm ergibt sich eine durchschnittliche Schweißbadbreite von 2 mm. Bezogen auf die Schweißgeschwindigkeit beträgt der verdampfende Werkstoff-Ressourcenfluss damit  $0,088 \text{ g s}^{-1}$ . Die Anzahl der Output-Ressourcen ist somit  $m = 3$ . Der Schweißdraht geht als Hilfsstoff während des Prozessschritts ‚Schweißen‘ in das Produkt ein. Für den Prozessschritt ‚Draht spitzen‘ sind der Output- und der Input-Ressourcenfluss des Schweißdrahts identisch. Die Output-Ressourcenflüsse des Schutzgases als Betriebsstoff entsprechen dessen Input-Ressourcenflüssen.

$$\underline{R}_{\text{out}}^{\text{HL}} = \begin{pmatrix} 0 \text{ g s}^{-1} & 0,003 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} & 0,031 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} \\ 0 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} & 0,594 \text{ g s}^{-1} & 0,594 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} \\ 0 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} & 0,088 \text{ g s}^{-1} & 0 \text{ g s}^{-1} \end{pmatrix}$$

Damit ergeben sich durch die Multiplikation der Ressourcenfluss-Prozessschritt-Matrizen mit den Arbeitszeiten der Prozessschritte folgende Ressourcenstrom-Vektoren:

$$\underline{r}_{\text{in}}^{\text{HL}} = \begin{pmatrix} r_{\text{in EN}}^{\text{HL}} \\ r_{\text{in SD}}^{\text{HL}} \\ r_{\text{in SG}}^{\text{HL}} \end{pmatrix} = \underline{R}'_{\text{in}}{}^{\text{HL}} \cdot \begin{pmatrix} 30 \text{ s} \\ 2 \text{ s} \\ 1,4 \text{ s} \\ 1 \text{ s} \\ 6 \text{ s} \\ 2,2 \text{ s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 257,684 \text{ kJ} \\ 0,41 \text{ g} \\ 4,16 \text{ g} \end{pmatrix}$$

$$\underline{r}_{\text{out}}^{\text{HL}} = \begin{pmatrix} r_{\text{out SD}}^{\text{HL}} \\ r_{\text{out SG}}^{\text{HL}} \\ r_{\text{out AL}}^{\text{HL}} \end{pmatrix} = \underline{R}'_{\text{out}}{}^{\text{HL}} \cdot \begin{pmatrix} 30 \text{ s} \\ 2 \text{ s} \\ 1,4 \text{ s} \\ 1 \text{ s} \\ 6 \text{ s} \\ 2,2 \text{ s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,19 \text{ g} \\ 4,16 \text{ g} \\ 0,53 \text{ g} \end{pmatrix}$$

Wie bereits beim Sägeprozess, treten auch bei dem untersuchten Fügeprozess keine Reuse-Ressourcenströme in der Prozesskette auf. Daher entsprechen die Brutto-Ressourcenströme den Netto-Ressourcenströmen und für den Prozess gilt:  $\underline{r}_{\text{in}}^{\text{HL}} := \underline{r}_{\text{in}}^{\text{HL}}$  und  $\underline{r}_{\text{out}}^{\text{HL}} := \underline{r}_{\text{out}}^{\text{HL}}$ .

**Zusammenfassung.** Entsprechend der Definition in Kapitel 4 lässt sich die Prozesskette  $k_{\text{HDL}}$  formal wie folgt zusammenfassen (vgl. Gleichung (4.10)):

$$\begin{aligned} k_{\text{HDL}} &= (\mathcal{A}_{\text{HDL}}, \mathcal{U}_{\text{HDL}}, \mathfrak{F}_{\text{HDL}}, \mathfrak{S}_{\text{HDL}}), \text{ wobei} \\ \mathcal{A}_{\text{HDL}} &= \left\{ \left\{ r_{\text{in EN}}, r_{\text{in AL}}, r_{\text{in SD}}, r_{\text{in SG}} \right\}, \right. \\ &\quad \left\{ r_{\text{out AL}}, r_{\text{out SD}}, r_{\text{out SG}} \right\}, \\ &\quad \left. \left\{ r_{\text{pro EN}}, r_{\text{pro AL}} \right\} \right\} \\ \mathcal{U}_{\text{HDL}} &= \left\{ \left\{ v_{\text{SA}}, v_{\text{HL}} \right\}, \right. \\ &\quad \left\{ f_{\text{subt}}, f_{\text{verb}} \right\}, \\ &\quad \left. \left\{ b_{\text{Säge}}, b_{\text{KS}}, b_{\text{SP}}, b_{\text{Anlage}}, b_{\text{DL}}, b_{\text{DZ}}, b_{\text{ST}}, b_{\text{RO}}, b_{\text{KU}}, b_{\text{ZA}}, b_{\text{KM}} \right\} \right\} \\ \mathfrak{F}_{\text{HDL}} &= \emptyset \\ \mathfrak{S}_{\text{HDL}} &= \{ p_{\text{SA}}, p_{\text{HL}} \} \end{aligned}$$

Die Quantitäten der Ressourcenströme der gesamten Prozesskette ergeben sich zu:

$$r_{\text{in}}^{\text{HDL}} = \begin{pmatrix} r_{\text{in EN}}^{\text{HDL}} \\ r_{\text{in AL}}^{\text{HDL}} \\ r_{\text{in SD}}^{\text{HDL}} \\ r_{\text{in SG}}^{\text{HDL}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 313,39 \text{ kJ} \\ 2201,4 \text{ g} \\ 0,41 \text{ g} \\ 4,16 \text{ g} \end{pmatrix}, \quad r_{\text{out}}^{\text{HDL}} = \begin{pmatrix} r_{\text{out AL}}^{\text{HDL}} \\ r_{\text{out SD}}^{\text{HDL}} \\ r_{\text{out SG}}^{\text{HDL}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 213,33 \text{ g} \\ 0,19 \text{ g} \\ 4,16 \text{ g} \end{pmatrix}$$

$$r_{\text{pro}}^{\text{HDL}} = \begin{pmatrix} r_{\text{pro EN}}^{\text{HDL}} \\ r_{\text{pro AL}}^{\text{HDL}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30,6 \text{ kJ} \\ 1988,6 \text{ g} \end{pmatrix}$$

### 6.3.2.2 Prozesskette FSW

Die Prozesse Sägen (SA)  $p_{\text{SA}}$  und Rührreißschweißen (FW)  $p_{\text{FW}}$  bilden gemeinsam die Prozesskette  $k_{\text{FSW}}$ . Abbildung 58 stellt die Prozesskette dar. Der Sägeprozess der Prozesskette FSW und dessen Ressourcenströme werden analog zu dem trennenden Prozess der Prozesskette HDL modelliert und berechnet (vgl. Abschnitt 6.3.2.1). Es muss folglich nur die Modellierung des Rührreißschweißens und die Quantifizierung der dazugehörigen Ressourcenströme durchgeführt werden.

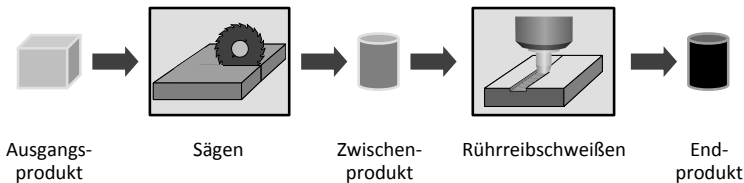


Abbildung 58: Vereinfachte Darstellung der Fertigungsprozesskette FSW

**Prozess Rührreißschweißen (FW).** Da das Rührreißschweißen eine recht junge Fertigungstechnologie ist, werden zunächst kurz dessen Herkunft und Ablauf beschrieben. Das Verfahren wurde 1991 zum Fügen von Aluminiumlegierungen erfunden. Seine Besonderheit liegt in der Verbindung zweier Bauteile ohne Aufschmelzen der Materialien. Das Rührreißschweißen gehört zu den Pressschweißverfahren. Das nahezu verschleißfeste Werkzeug besitzt zwei charakteristische Merkmale mit unterschiedlichen Funktionen im Prozess. Diese sind ein speziell geformter Werkzeugstift (Pin) und eine Werkzeugschulter. Abbildung 59 zeigt den Aufbau eines FSW-Werkzeugs.

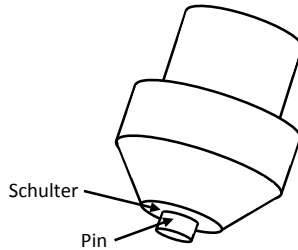


Abbildung 59: FSW-Werkzeug nach VÖLLNER (2010, S. 9)

Der Ablauf des Schweißvorgangs lässt sich nach VÖLLNER (2010, S. 10) in vier Phasen unterteilen. Zunächst wird das um die eigene Achse rotierende Werkzeug in den Fügespalt eingedrückt, bis die Werkzeugschulter mit der Oberfläche in Kontakt kommt. Dabei entsteht Reibung, die die Fügepartner erwärmt. Anschließend wird das rotierende Werkzeug weiter mit hoher Kraft auf die Fügestelle gepresst, was das Material in einen lokal plastifizierten Zustand versetzt. Die Temperatur bleibt dabei unter der Schmelztemperatur des Werkstoffs. In der dritten Phase bewegt sich das Werkzeug entlang des Fügestoßes. Dabei erzeugt die Werkzeugschulter weiterhin Reibungswärme und hält das Material in der Fügezone. Der Werkzeugpin durchmischt gleichzeitig das Material der Fügepartner, wodurch eine Warmpressschweißverbindung hergestellt wird. In der letzten Phase wird die Vorschubbewegung des Werkzeugs beendet und das Werkzeug aus der Schweißnaht zurückgezogen, wodurch ein Negativabdruck des Werkzeugs, ein sogenannter Endkrater, in dem Bauteil verbleibt.

Der Rührschweißprozess  $p_{FW}$  stellt das Feature  $f_{verb}$  her. Hierfür führt dieser die Fügetechnologie  $v_{FW}$  auf einer Werkzeugmaschine  $b_{WZM}$  aus. Die Werkzeugmaschine setzt sich aus energetischer Sicht aus mehreren Verbrauchern zusammen:

- Wirkenergiequelle Spindel (SI)  $b_{SI} \mid SI \in I_{B_W}$
- Nebenantrieb x-Achse (AX)  $b_{AX} \mid AX \in I_{B_N}$
- Nebenantrieb y-Achse (AY)  $b_{AY} \mid AY \in I_{B_N}$
- Nebenantrieb z-Achse (AZ)  $b_{AZ} \mid AZ \in I_{B_N}$
- Nebenantrieb b-Achse (AB)  $b_{AB} \mid AB \in I_{B_N}$
- Hilfsaggregat Steuergerät (SR)  $b_{SR} \mid SR \in I_{B_H}$
- Hilfsaggregat Hydraulikaggregat Palette (HP)  $b_{HP} \mid HP \in I_{B_H}$

Auch beim Rührreißschweißprozess wird von der Zuordnung der Zustände der einzelnen Verbraucher zu den Prozessschritten aufgrund der Vielzahl an Verbrauchern abgesehen. Die energetischen Ressourcenflüsse werden den Prozessschritten hingegen direkt zugeordnet. Die verwendete Werkzeugmaschine Heller MCH250 verfügt über zwei Paletten, um parallel zur Bearbeitung ein neues Werkstück einspannen zu können. Die Dauer während der Prozessschritte ‚Anfahren‘, ‚Schweißen‘ und ‚Rückfahren‘ ist zudem ausreichend lang, um das Einspannen eines neuen Werkstücks während der Bearbeitungszeit zu ermöglichen. Der Vorgang des Eintauchens des Werkzeugs wird im Rahmen des Schweißvorgangs betrachtet und ist daher nicht extra aufgeführt. Die sich ergebenden Prozessschritte und deren Arbeitszeiten sind:

$$\begin{aligned}
 s_{SA} &= \{s_{\text{Paletten wechseln}}, s_{\text{Anfahren}}, s_{\text{Schweißen}}, s_{\text{Rückfahren}}\} \\
 t_{SA} &= \{t_{\text{Paletten wechseln}}, t_{\text{Anfahren}}, t_{\text{Schweißen}}, t_{\text{Rückfahren}}\} \\
 &= \{14\text{ s}, 15\text{ s}, 33\text{ s}, 9\text{ s}\}
 \end{aligned}$$

Dabei gilt  $s_{\text{Paletten wechseln}} \in I_{S_N}$ ,  $s_{\text{Anfahren}} \in I_{S_N}$ ,  $s_{\text{Schweißen}} \in I_{S_H}$  und  $s_{\text{Rückfahren}} \in I_{S_N}$ . Für jeden Verbraucher kann ein Prozessschritt-Ressourcenfluss-Zeilenvektor  $r'_{\text{in EN}}$  für dessen benötigte elektrische Leistung angegeben werden. Dieser ist für jeden Verbraucher in Tabelle 12 angegeben.

Tabelle 12: Zuordnung der elektrischen Leistungen der Verbraucher zu den Prozessschritten

	Paletten wechseln	Anfahren	Schweißen	Rückfahren
$b_{SI}$	900 W	1900 W	3200 W	900 W
$b_{AX}$	410 W	410 W	1910 W	410 W
$b_{AY}$	410 W	410 W	410 W	410 W
$b_{AZ}$	800 W	2000 W	2300 W	800 W
$b_{AB}$	410 W	410 W	410 W	410 W
$b_{SR}$	870 W	870 W	870 W	870 W
$b_{HP}$	1440 W	0 W	0 W	0 W



Gesamthaft ergibt sich für den Prozess  $p_{FW}$  folgender Brutto-Input-Ressourcenfluss-Vektor für elektrische Leistung:

$$\underline{r}_{in EN}^{HL} = (5240 \text{ W} \quad 6000 \text{ W} \quad 9100 \text{ W} \quad 3800 \text{ W})$$

Hinsichtlich des Verbrauchs an materiellen Ressourcen gibt es beim Rührreißschweißen eine Besonderheit. Aufgrund des oben beschriebenen Endkraters muss das Ende der Schweißnaht außerhalb des Werkstücks liegen. Dies wird durch die Nutzung eines Auslaufblechs gewährleistet, welches die Schweißnaht künstlich verlängert und anschließend entsorgt wird. Aufgrund der Durchmischung des Materials während des Prozesses geht ein Teil des Auslaufblechmaterials in das Werkstück ein. Daher wird als Material das Werkstoffmaterial EN AW 6060 genutzt. Es handelt sich folglich um einen Hilfsstoff, der mit einem Ressourcenfluss von  $0,67 \text{ g s}^{-1}$  während des Prozessschritts ‚Schweißen‘ als Input- und Output-Ressourcenfluss auftritt. Für den Rührreißschweißprozess selbst bedarf es sonst keiner weiterer Hilfs- oder Betriebsstoffe. Prozessunabhängig benötigt die Werkzeugmaschine jedoch einige diskontinuierliche Betriebsstoffe, die im Jahresrhythmus ausgetauscht werden müssen.

Bei der Produktion in einer Schicht und einer 5-Tage-Woche mit  $8 \text{ h d}^{-1}$  können bei einer Gesamtarbeitszeit pro Produkt von 71 s und einem angenommenen Verteilzeitanteil von 30 % rechnerisch 73825 Produkte pro Jahr hergestellt werden. Der Jahresverbrauch der Betriebsstoffe wird daher auf die Jahresstückzahl des Produkts umgelegt. Zunächst müssen hierzu die Volumina der auszutauschenden Betriebsstoffe mit der Dichte der Betriebsstoffe multipliziert werden. In Tabelle 13 sind die Betriebsstoffverbräuche pro Produkt angegeben, wobei die Dichte von HLP46 (OH)  $0,874 \text{ kg l}^{-1}$ , von CLP46 (OC)  $0,89 \text{ kg l}^{-1}$ , von CLP220 (OL)  $0,9 \text{ kg l}^{-1}$  und von Leitungswasser (LW)  $1 \text{ kg l}^{-1}$  beträgt.

Tabelle 13: Ressourcenströme der diskontinuierlichen Betriebsstoffe

Anwendung	Ressource	Verbrauch pro Jahr	Verbrauch pro Produkt
Öl für Hydraulik	HLP46	190 l/a	2,249 g/Produkt
Öl für Ölkühler	CLP46	5 l/a	0,060 g/Produkt
Öl für Rundlauftisch	CLP220	1,5 l/a	0,018 g/Produkt
Öl für Werkzeugwechsler	CLP220	12 l/a	0,146 g/Produkt
Schmiermittel	CLP46	1,5 l/a	0,018 g/Produkt
Kühlwasser	Leitungswasser	42 l/a	0,569 g/Produkt

Auf Basis dieser Ressourcenströme und nach der Multiplikation der Ressourcenflüsse mit den entsprechenden Arbeitszeiten ergeben sich für den Rührreißschweißprozess folgende Ressourcenstrom-Vektoren:

$$\underline{r}_{\text{in}}^{\text{FW}} = \begin{pmatrix} r_{\text{in EN}}^{\text{FW}} \\ r_{\text{in AL}}^{\text{FW}} \\ r_{\text{in OH}}^{\text{FW}} \\ r_{\text{in OC}}^{\text{FW}} \\ r_{\text{in OL}}^{\text{FW}} \\ r_{\text{in LW}}^{\text{FW}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 497,86 \text{ kJ} \\ 22,11 \text{ g} \\ 2,249 \text{ g} \\ 0,078 \text{ g} \\ 0,165 \text{ g} \\ 0,569 \text{ g} \end{pmatrix}, \quad \underline{r}_{\text{out}}^{\text{FW}} = \begin{pmatrix} r_{\text{out AL}}^{\text{FW}} \\ r_{\text{out OH}}^{\text{FW}} \\ r_{\text{out OC}}^{\text{FW}} \\ r_{\text{out OL}}^{\text{FW}} \\ r_{\text{out LW}}^{\text{FW}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 22,11 \text{ g} \\ 2,249 \text{ g} \\ 0,078 \text{ g} \\ 0,165 \text{ g} \\ 0,569 \text{ g} \end{pmatrix}$$

Erneut treten keine Reuse-Ressourcenströme auf und es gilt:  $\underline{r}_{\text{in}}^{\text{FW}} := \underline{r}_{\text{in}}^{\text{FW}}$  und  $\underline{r}_{\text{out}}^{\text{FW}} := \underline{r}_{\text{out}}^{\text{FW}}$ .

**Zusammenfassung.** Die Prozesskette  $k_{\text{FSW}}$  ist durch ihre Attribute, Systemelemente und Subsysteme wie folgt beschrieben (vgl. Gleichung (4.10)):

$$\begin{aligned} k_{\text{FSW}} &= (\mathfrak{A}_{\text{FSW}}, \mathfrak{U}_{\text{FSW}}, \mathfrak{F}_{\text{FSW}}, \mathfrak{S}_{\text{FSW}}), \text{ wobei} \\ \mathfrak{A}_{\text{FSW}} &= \left\{ \{r_{\text{in EN}}, r_{\text{in AL}}, r_{\text{in OH}}, r_{\text{in OC}}, r_{\text{in OL}}, r_{\text{in LW}}\}, \right. \\ &\quad \{r_{\text{out AL}}, r_{\text{out OH}}, r_{\text{out OC}}, r_{\text{out OL}}, r_{\text{out LW}}\}, \\ &\quad \left. \{r_{\text{pro EN}}, r_{\text{pro AL}}\} \right\} \\ \mathfrak{U}_{\text{FSW}} &= \left\{ \{v_{\text{SA}}, v_{\text{HL}}\}, \right. \\ &\quad \{f_{\text{subt}}, f_{\text{verb}}\}, \\ &\quad \left. \{b_{\text{Säge}}, b_{\text{KS}}, b_{\text{SP}}, b_{\text{WZM}}, b_{\text{SI}}, b_{\text{AZ}}, b_{\text{AX}}, b_{\text{AY}}, b_{\text{AB}}, b_{\text{SR}}, b_{\text{HP}}\} \right\} \\ \mathfrak{F}_{\text{FSW}} &= \emptyset \\ \mathfrak{S}_{\text{FSW}} &= \{p_{\text{SA}}, p_{\text{HL}}\} \end{aligned}$$

Die Quantitäten der Ressourcenströme der gesamten Prozesskette  $k_{\text{FSW}}$  ergeben sich zu:

$$\underline{r}_{\text{in}}^{\text{FSW}} = \begin{pmatrix} r_{\text{in EN}}^{\text{FSW}} \\ r_{\text{in AL}}^{\text{FSW}} \\ r_{\text{in OH}}^{\text{FSW}} \\ r_{\text{in OC}}^{\text{FSW}} \\ r_{\text{in OL}}^{\text{FSW}} \\ r_{\text{in LW}}^{\text{FSW}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 553,56 \text{ kJ} \\ 2223,51 \text{ g} \\ 2,249 \text{ g} \\ 0,078 \text{ g} \\ 0,165 \text{ g} \\ 0,569 \text{ g} \end{pmatrix}, \quad \underline{r}_{\text{out}}^{\text{FSW}} = \begin{pmatrix} r_{\text{out AL}}^{\text{FSW}} \\ r_{\text{out OH}}^{\text{FSW}} \\ r_{\text{out OC}}^{\text{FSW}} \\ r_{\text{out OL}}^{\text{FSW}} \\ r_{\text{out LW}}^{\text{FSW}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 234,91 \text{ g} \\ 2,249 \text{ g} \\ 0,078 \text{ g} \\ 0,165 \text{ g} \\ 0,569 \text{ g} \end{pmatrix}$$

$$r_{\text{pro}}^{\text{FSW}} = \begin{pmatrix} r_{\text{pro EN}}^{\text{FSW}} \\ r_{\text{pro AL}}^{\text{FSW}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30,6 \text{ kJ} \\ 1988,6 \text{ g} \end{pmatrix}$$

### 6.3.3 Bestimmung der Ressourcenfaktoren

Für die Bestimmung der Input-Ressourcenfaktoren wurde die in Abbildung 60 dargestellte Kriterienhierarchie für Input-Ressourcen festgelegt. Für die Attribute auf der jeweils untersten Ebene der Hierarchie werden die Ausprägungen der idealen und anti-idealen Ressourcen in Tabelle 14 aufgeführt.

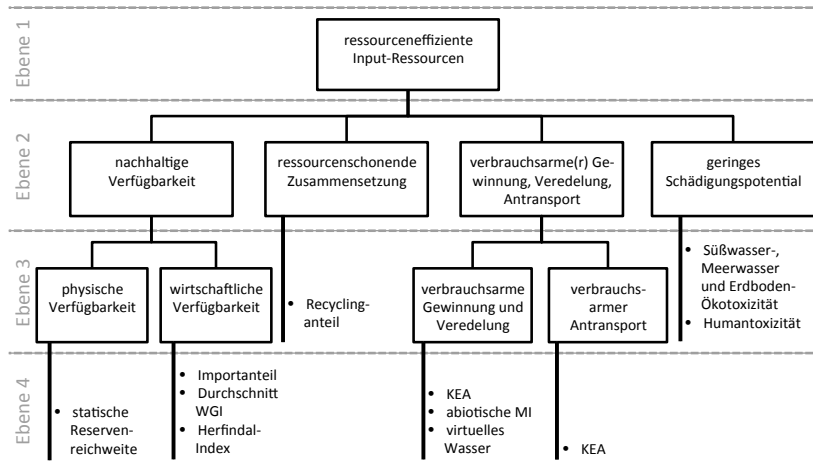


Abbildung 60: Hierarchie der Ressourceneffizienz-Kriterien für Input-Ressourcen

Die gewählten Attribute im Bereich der nachhaltigen Verfügbarkeit sind die statische Reservenreichweite<sup>34</sup>, der Importanteil der Ressource, der Durchschnitt der Worldwide Governance Indicators (WGI) der liefernden Länder und der Herfindal-Index als Konzentrationsmaß für die Lieferanten der Ressource. Die ressourcenschonende Zusammensetzung wird durch den Recyclinganteil wiedergegeben. Der verbrauchsarme Antransport wird durch den KEA der Anlieferung vom jeweiligen Lieferanten repräsentiert. Die verbrauchsarme Gewinnung und

<sup>34</sup> Reserven sind die nachgewiesenen und mit bekannten Technologien wirtschaftlich gewinnbaren Vorkommen. Ressourcen hingegen sind aktuell nicht wirtschaftlich förderbar oder sind noch nicht sicher ausgewiesen. Sie werden jedoch aufgrund geologischer Indikatoren erwartet. Damit können Ressourcen durch Preissteigerungen an den Weltrohstoffmärkten oder durch neue Explorationsergebnisse zu Reserven werden.

Veredelung haben als beschreibende Attribute den KEA, das virtuelle Wasser und die abiotische Materialintensität (MI) als eine Größe der MIPS-Methode (vgl. Abschnitt 2.2.4). Das Schädigungspotential der Vorprozesse wird durch Süßwasser-, Meerwasser- und Erdboden-Ökotoxizität sowie Humantoxizität ausgewiesen. Die Toxizitäten werden entsprechend der CML 2002-Methode in kg 1,4-Dichlorbenzol-Äquivalent (kg 1,4-DCB-Äqu.) angegeben. 1,4-Dichlorbenzol ist ein für den Menschen und die Umwelt sehr schädlicher sowie schlecht abbaubarer Stoff und dient deshalb häufig als Referenz für Toxizitätsindikatoren.

Tabelle 14: Ausprägungen der idealen und anti-idealen Ressourcen bezüglich der Input-Attribute basierend auf Expertenschätzungen

<b>Input-Attribut</b>	<b>ideale Ausprägung</b>	<b>anti-ideale Ausprägung</b>
statische Reservenreichweite	681 a	6 a
Importanteil	0 %	100 %
Durchschnitt WGI	2,5	-2,5
Herfindal-Index	0	1
Recyclinganteil	100 %	0 %
KEA Gewinnung/Veredelung	0 MJ/kg bzw. MJ/MJ	50 MJ/kg bzw. MJ/MJ
abiotische MI Gewinnung/Veredelung	0 kg/kg bzw. kg/MJ	90 kg/kg bzw. kg/MJ
virtuelles Wasser Gewinnung/Veredelung	0 kg/kg bzw. kg/MJ	750 kg/kg bzw. kg/MJ
KEA Antransport (von Lieferant)	0 MJ/kg bzw. MJ/MJ	300 MJ/kg bzw. MJ/MJ
Süßwasser-Ökotoxizität	0 kg 1,4-DCB-Äqu./kg bzw. /MJ	0,06 kg 1,4-DCB-Äqu./kg bzw. /MJ
Meerwasser-Ökotoxizität	0 kg 1,4-DCB-Äqu./kg bzw. /MJ	400 kg 1,4-DCB-Äqu./kg bzw. /MJ
Erdboden-Ökotoxizität	0 kg 1,4-DCB-Äqu./kg bzw. /MJ	0,03 kg 1,4-DCB-Äqu./kg bzw. /MJ
Humantoxizität	0 kg 1,4-DCB-Äqu./kg bzw. /MJ	8 kg 1,4-DCB-Äqu./kg bzw. /MJ

Die Output-Ressourcenfaktoren werden auf Basis der in Abbildung 61 gezeigten Hierarchie der Ressourceneffizienz-Kriterien für Output-Ressourcen abgeleitet. Die Ermöglichung der Ressourcenschonung wird im vorliegenden Fall durch den recyclingfähigen Anteil der Output-Ressource wiedergegeben. Wie verbrauchsarm der Abtransport, die Trennung und die Entsorgung einer Ressource

ist, wird durch den jeweiligen KEA angegeben. Schließlich wird ein geringes Schädigungspotential angestrebt. Dies wird hinsichtlich der Schädigung des Menschen betrachtet, indem die akute orale Toxizität, die Inhalationstoxizität sowie die Hautreizung der Output-Ressource als Attribute angegeben werden. Die Schädigung der Umwelt wird durch die Wassergefährdungsklasse sowie die biologische Abbaubarkeit der Ressource wiedergespiegelt. Die Ausprägungen der idealen und anti-idealen Ressourcen für jedes Attribut sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

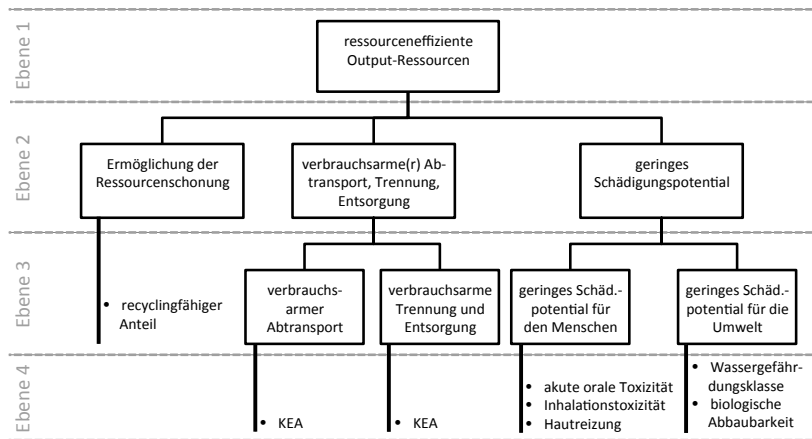


Abbildung 61: Hierarchie der Ressourceneffizienz-Kriterien für Output-Ressourcen

Tabelle 15: Ausprägungen der idealen und anti-idealen Ressourcen bezüglich der Output-Attribute basierend auf Expertenschätzungen

Output-Attribut	ideale Ausprägung	anti-ideale Ausprägung
recyclingfähiger Anteil	100 %	0 %
KEA Abtransport (zur Entsorgungsstelle)	0 MJ/kg	300 MJ/kg
KEA Trennung/Entsorgung	0 MJ/kg	40 MJ/kg
akute orale Toxizität	0	5
Inhalationstoxizität	0	5
Hautreizung	0	5
Wassergefährdungsklasse	0	3
biologische Abbaubarkeit	0	5

Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 5 werden über die Artenpräferenz die Präferenzen des Entscheiders in die Gewichtung der Ressourceneffizienz-Kriterien überführt. Eine Auflistung der globalen Kriteriengewichte findet sich in Anhang B.2. Auf Basis der Ausprägungen der idealen und anti-idealen Ressourcen bezüglich der Input- bzw. Output-Attribute und der Ausprägungen der einzelnen Ressourcen<sup>35</sup> werden die entsprechenden Höhenpräferenzen bestimmt. Damit können die Input- bzw. Output-Ressourcenfaktoren für die auftretenden Ressourcenströme im Rahmen des oben beschriebenen Prozesskettenvergleichs abgeleitet werden. Die Werte der Ressourcenfaktoren sind in Tabelle 16 aufgelistet.

Tabelle 16: Input- und Output-Ressourcenfaktoren der auftretenden Ressourcenströme

Input-Ressourcenfaktoren		Output-Ressourcenfaktoren	
$\omega_{in AL}$	0,418	$\omega_{out AL}$	0,355
$\omega_{in SD}$	0,511	$\omega_{out SD}$	0,355
$\omega_{in SG}$	0,252	$\omega_{out SG}$	0,190
$\omega_{in OH}, \omega_{in OC},$ $\omega_{in OL}$	0,543	$\omega_{out OH}, \omega_{out OC},$ $\omega_{out OL}$	0,241
$\omega_{in LW}$	0,183	$\omega_{out LW}$	0
$\omega_{in EN}$	0,374		

### 6.3.4 Bewertung der Ressourceneffizienz

Basierend auf den Input- und Output-Ressourcenströmen der beiden Prozessketten, den Produkt-Ressourcenströmen sowie den abgeleiteten Ressourcenfaktoren, können jeweils Material-, Energie- und Ressourceneffizienz berechnet werden. Diese Kennzahlen werden einmal im engeren Sinne, also ohne die charakteristischen Ressourcenfaktoren zu integrieren, und einmal im weiteren Sinne bestimmt. Tabelle 17 fasst die Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz für die Prozessketten  $k_{HDL}$  und  $k_{FSW}$  zusammen.

Anhand der Kennzahlen wird deutlich, dass  $k_{HDL}$  eine leicht höhere Ressourceneffizienz aufweist als deren Alternative  $k_{FSW}$ . Dieses Ergebnis ändert sich auch bei der Bewertung der Ressourceneffizienz im weiteren Sinne nicht. Da die Bewertung auf gemessenen Werten beruht, kann trotz der geringen Differenz zwischen den jeweiligen Kennzahlen für den vorliegenden Bewertungsfall hinsichtlich der Ressourceneffizienz eine eindeutige Aussage zugunsten der Prozesskette  $k_{HDL}$  gemacht werden. Um neben diesem Bewertungsergebnis

<sup>35</sup> Die Ausprägungen der einzelnen Ressourcen als Input und Output werden in Anhang B.3 aufgeführt.

mögliche Optimierungspotentiale herauszuarbeiten, sind weitere Analysen notwendig.

Tabelle 17: Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz

Kennzahlen der Prozesskette		$k_{\text{HDL}}$	$k_{\text{FSW}}$
Materialeffizienz im engeren Sinne	$\mu_{\text{ieS}}$	82,0%	80,7%
Energieeffizienz im engeren Sinne	$\varepsilon_{\text{ieS}}$	9,8%	5,5%
Ressourceneffizienz im engeren Sinne	$\varrho_{\text{ieS}} (\alpha = 0,5)$	45,9%	43,1%
Materialeffizienz im weiteren Sinne	$\mu$	83,3%	81,9%
Energieeffizienz im weiteren Sinne	$\varepsilon$	9,8%	5,5%
Ressourceneffizienz im weiteren Sinne	$\varrho (\alpha = 0,5)$	46,5%	43,7%

Insbesondere die schlechtere Kennzahl für die Energieeffizienz der Prozesskette  $k_{\text{FSW}}$  ist vor dem Hintergrund des hohen Leistungsbedarfs des Lasers nicht direkt nachvollziehbar. Daher erfolgt eine Analyse der Energieverbräuche während der einzelnen Prozessschritte. Der allen Prozessketten gleiche Sägeprozess muss dabei nicht weiter berücksichtigt werden. Der Haupt-Prozessschritt ‚Schweißen‘ ist hierbei besonders auffällig. Obwohl der Gesamtbedarf an elektrischer Leistung aller Verbraucher während des Schweiß-Prozessschritts des Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißprozesses mit 22 480 W mehr als doppelt so hoch ist wie der des Rührreibschweißprozesses mit 9100 W, führt die mehr als fünfmal so lange Schweißdauer zu einem größeren Energiebedarf des Rührreibschweißprozesses. Auch während der sonstigen Zustände benötigt der Rührreibschweißprozess eine große Menge an Energie, was einerseits auf die hohe Grundlast der Werkzeugmaschine und andererseits auf die langen Zustandszeiten zurückgeführt werden kann.

In beiden Prozessketten geht nur ein geringer Anteil des ursprünglichen Werkstoffs verloren. Außerdem ist die Masse der eingesetzten Hilfs- und Betriebsstoffe im Vergleich zu dem materiellen Produkt-Ressourcenstrom gering. Die Werkzeugmaschine des Rührreibschweißprozesses benötigt einige Betriebsstoffe, welche in regelmäßigen Intervallen ausgetauscht werden müssen. Zusätzlich ist zur Vermeidung des Endkraters in der Schweißnaht ein Auslaufflech erforderlich. Durch diese zusätzlichen Materialströme fällt der Rührreibschweißprozess auch hinsichtlich der Materialeffizienz hinter den Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißprozess zurück.

Neben der genaueren Analyse der Quantitäten von Input- und Output-Ressourcen ist über die charakteristischen Ressourcenfaktoren eine Berücksichtigung weiterer Auswirkungen einzelner Ressourcen möglich. Somit kann bei Verbesserungsmaßnahmen insbesondere der Einsatz bzw. der Ausstoß solcher Ressourcen, die aus Sicht des Unternehmens als kritisch eingestuft werden, minimiert werden. Mithilfe der auf direkten Ressourcenströmen und Ressourcenfaktoren basierenden Analysen können Schwachstellen gezielt herausgearbeitet werden, was besonders bei einer Bewertung und Analyse während der Planungsphase zur Verringerung des späteren Ressourcenverbrauchs in der Fertigung führen kann.

### 6.4 Bewertung der Methode

Auf Basis der oben beschriebenen Anwendung der Methode wird die Erfüllung der in Abschnitt 3.2 gestellten Anforderungen diskutiert. Anschließend erfolgt ein Überblick über den nötigen Aufwand für die Datenbeschaffung und Bewertung. Schließlich wird der Nutzen der Ressourceneffizienz-Bewertung in der Fertigung herausgearbeitet.

**Erfüllung der Anforderungen.** Da die Methode auf Basis der Anforderungen konzipiert wurde, wurden diese gesamthaft berücksichtigt. Die Umsetzung der einzelnen Anforderungen macht sich bei der Bewertung wie folgt bemerkbar:

- A1 *Quantitative Bewertung der Ressourceneffizienz:* Durch die entwickelten Kennzahlen für Energie-, Material- und Ressourceneffizienz im engeren sowie im weiteren Sinne kann die aus Sicht der Ressourceneffizienz vorteilhafteste Prozesskette eindeutig identifiziert werden. Für jede Kennzahl wird ein quantitatives Bewertungsergebnis erzeugt, das sich im Wertebereich von 0 bis 1 bzw. von 0 bis 100 % befindet.
- A2 *Konformität mit dem Ökobilanzierungsvorgehen:* Die Phasen der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz orientieren sich an den Phasen für eine ökologische Bewertung nach DIN 14040 (2006). Vor allem die z. T. unscharf definierten Bewertungsziele sowie Bewertungsobjekte mancher Ökobilanzierungsstudien von Fertigungsprozessen werden bei der Anwendung der auf die Fertigung zugeschnittenen Methode klar umrissen.
- A3 *Vergleichbarkeit von Fertigungsprozessketten:* Insbesondere das in Kapitel 4 vorgestellte Modellierungsvorgehen führt zu einer präzisen Festlegung der Systemgrenzen des Vordergrundsystems und bietet damit eine stabile Basis



für einen Vergleich von alternativen Prozessketten. Die Definition der Produkt-Ressourcenströme liefert zudem eine eindeutige Beschreibung der funktionellen Einheit, die im Rahmen eines Vergleichs für alle Prozessketten übereinstimmt.

- A4 *Generische Anwendbarkeit für alle Technologien:* Aufgrund der systemtheoretischen Modellierung von Fertigungsprozessketten mithilfe der Mengenschreibweise ist deren Abbildung auf einem Abstraktionsgrad möglich, der es zulässt, jedwede Konstellation von Technologieanwendungen im Rahmen der DIN 8580 (2003) zu bewerten. Gleichzeitig unterstützt die einheitliche Modellierung der Prozessketten, beispielsweise durch die Klassifizierung gewisser Systemelemente, bei der Quantifizierung der für die Bewertung relevanten Ressourcenströme.
- A5 *Beachtung der Ausprägungen von Ressourcen:* Bei der Modellbildung wurden die Ressourcen grundsätzlich in materielle und energetische Ressourcen unterteilt. Für jede Gruppe wird zudem eine eigene Kennzahl zur Verfügung gestellt. Eine Besonderheit stellen die indirekt energetischen Ressourcen dar, die als materielle Ressourcen in den jeweiligen Prozess eingehen und diesen verlassen und gleichzeitig Energie für den Prozess bereitstellen. Diese Unterscheidung zwischen Ressourcenarten wird durch die definierten Kennzahlen wiedergespiegelt. Unterschiedliche Aggregatzustände werden bei der Verrechnung der Ressourcenströme durch die Vorgabe, alle Quantitäten als Massen anzugeben, nicht direkt sichtbar. Bei der Ableitung der charakteristischen Ressourcenfaktoren wird der jeweilige Aggregatzustand allerdings indirekt berücksichtigt, da dieser die Auswirkungen der Ressource und damit die angegebene Ausprägung hinsichtlich eines Ressourceneffizienz-Kriteriums wesentlich beeinflussen kann.
- A6 *Systematische Berücksichtigung der Umweltwirkungen sowie der Vor- und Nachprozesse:* In Abschnitt 5.3 wurde ein Vorgehen zur Identifizierung von Kriterien beschrieben, die die Umweltwirkungen der Ressourcenströme einer Prozesskette sowie die Auswirkungen von vor- und nachgelagerten Prozessen auf die Ressourceneffizienz wiedergeben. Sie werden über multikriterielle Bewertungsmethoden zu den charakteristischen Input- und Output-Ressourcenfaktoren zusammengefasst und gehen in die Kennzahlen zur Bewertung im weiteren Sinne ein. Das gesamte zur Verfügung gestellte Vorgehen bildet somit einen systematischen Rahmen zur Berücksichtigung der Auswirkungen von Ressourcenströmen in der Bewertung.
- A7 *Integration der Unternehmenspräferenzen:* Die Unternehmenspräferenzen beeinflussen die Bewertung an drei Punkten. Erstens kann der Gewichtungsfaktor  $\alpha$ , der das Verhältnis von Energie- und Materialeffizienz für

die Bestimmung der Ressourceneffizienz festlegt, frei gewählt werden. Dies ermöglicht es beispielsweise, der Energieeffizienz eine besondere Wichtigkeit zuzuschreiben, ohne die Materialeffizienz außer Acht zu lassen. Zweitens können die eigenen Unternehmensziele bei der Festlegung der relevanten Ressourceneffizienz-Kriterien berücksichtigt werden. Drittens erfolgt im Rahmen des paarweisen Kriterienvergleichs eine Abfrage der Präferenzen, wodurch die Unternehmensstrategie in der Gewichtung der Ressourceneffizienz-Kriterien verankert werden kann.

A8 *Anwenderfreundlichkeit*: Bei der Modellierung der Ressourcenströme wird auf bestehende Konventionen und bekannte Daten der Fertigungsplanung zurückgegriffen. Das verringert zum einen den Aufwand zur Datenbeschaffung. Zum anderen wird auch die Akzeptanz der Bewertung der Ressourceneffizienz im Fertigungsbereich gefördert. Durch die Bereitstellung des Softwaretools *REvalue*, das die entwickelte Methode umsetzt, wird die Anwenderfreundlichkeit stark verbessert: Der Anwender wird durch die zugrunde liegende systemtheoretische Modellierung der jeweiligen Prozesskette geleitet und schrittweise zur Dateneingabe aufgefordert. Auch die Daten für die Bestimmung der Ressourcenfaktoren können im Tool hinterlegt werden. Auf Basis der Angaben zur Kriterienhierarchie werden automatisch die benötigten Angaben des paarweisen Vergleichs abgefragt. Zudem werden die Ausprägungen der idealen und anti-idealen Ressource aufgenommen. Mithilfe einer Materialdatenbank können die Ausprägungen der einzelnen Ressourcen hinterlegt werden. Diese Angaben sind einmalig durchzuführen und können in späteren Bewertungen wiederverwendet werden. Gleiches gilt für die Referenz-Energiebeträge und dazugehörige Bezugsgrößen von Features, die in einer separaten Datenbank für spätere Bewertungen gespeichert werden.

**Aufwand für die Anwendung.** Hinsichtlich des Aufwands für die Anwendung der Methode ist zwischen dem einmaligen, initialen Aufwand und dem Aufwand pro Bewertungsfall zu unterscheiden. Der *Initialaufwand* besteht zum einen aus der Festlegung der Ressourceneffizienz-Kriterien sowie den Angaben der Präferenzen im Rahmen eines paarweisen Vergleichs. Diese Inhalte sind abhängig von der jeweiligen Branche sowie der angebotenen Produktpalette und sollten ein zentraler Bestandteil der Nachhaltigkeitsstrategie des Unternehmens sein. Die für das Unternehmen relevanten Kriterien sollten in einem Gremium mit Energie- und Ressourceneffizienz-Spezialisten und der Unternehmensführung festgelegt werden und unternehmensweite Gültigkeit besitzen.

Außerdem müssen die häufig verwendeten Ressourcen in der Ressourcen-Datenbank angelegt und die Ausprägungen für die Attribute der jeweils un-

tersten Ebene der Kriterienhierarchie angegeben werden. Der Aufwand der notwendigen Datenbeschaffung für die Ausprägungen der Kriterien der eingesetzten Ressourcen hängt stark von den zugänglichen Informationsquellen ab. Die Anschaffungskosten für die entsprechenden Datenbanken der GaBi Software betragen z. B. ca. 10.000 €. Je nach Umfang der eingesetzten Ressourcen variiert die grundlegende Datenbeschaffung zwischen 5 und 20 Arbeitstagen. Hat sich das Unternehmen bereits im Vorfeld zur Bewertung im Rahmen der Fertigung mit der Ökobilanzierung der eigenen Produkte befasst, so verringert sich der Aufwand auf wenige Arbeitstage.

*Pro Bewertungsfall* müssen die Ressourcenströme quantifiziert werden. Bezüglich der energetischen Ressourcenströme fällt ggf. Aufwand für Leistungsmessungen an, falls im Unternehmen vorhandene Anlagen in die bewerteten Prozessketten integriert sind bzw. werden. Wird die Bewertung in der Planungsphase durchgeführt und liegen noch keine Daten zur benötigten elektrischen Leistung der Betriebsmittel vor, sollten die Lieferanten Basisdaten für prozessunabhängige Zustände der Verbraucher zur Verfügung stellen. Konzepte, wie diese Daten bereits im Rahmen von Lasten- und Pflichtenheft bereitgestellt werden sollten, liefern MÜLLER ET AL. (2010). Für den konkreten Fertigungsprozess wird in einem solchen Fall der theoretische Energiebedarf zur reinen Veränderung des Bauteils kalkuliert oder geschätzt. Die Daten für die Arbeitszeiten liegen i. d. R. im Rahmen der Fertigungsplanung vor. Die materiellen Ressourcenströme sind meist bekannt oder lassen sich leicht abschätzen, so dass für die Beschaffung dieser Daten kein großer Aufwand nötig ist. Insgesamt ist für die Quantifizierung der Ressourcenströme eines Prozesses mit 1 bis 2 Arbeitstagen zu rechnen.

**Nutzen der Methode.** Die Vorteile, die der Einsatz der Methode mit sich bringt, sind vielfältig. Allerdings ist der Nutzen in seinem vollen Umfang nicht quantifizierbar. Das dem *Gemeinwohl* zuträglichste Ziel, durch die Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung einen Beitrag zur Entkopplung des Ressourcenverbrauchs vom Wirtschaftswachstum zu erreichen, stellt einen solchen nicht messbaren Vorteil dar. Für das einzelne Unternehmen ist dieser Aspekt besonders im Zusammenhang mit dessen Corporate Social Responsibility (CSR) bzw. unternehmerischer Gesellschaftsverantwortung von Wichtigkeit. Ausführungen zur Abschätzung des ökonomischen Nutzens der CSR werden in der betriebswirtschaftlichen Literatur diskutiert, führen jedoch im Rahmen dieser Arbeit zu weit.

Grundsätzlich hat die Wahl der ressourceneffizientesten Alternative im Planungsprozess die *Reduzierung der laufenden Kosten* für Werk-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie der Energiekosten zur Folge. Über die Ressourcenfaktoren

werden außerdem Ressourcen mit einer guten Verfügbarkeit bevorzugt, sodass auch eine integrierte Absicherung gegen Preissteigerungen aufgrund schlechter Verfügbarkeit aus geologischen oder ökonomischen Gründen erfolgt. Weiterhin führt die Minimierung der Output-Ressourcenströme und insbesondere die der kritischen Ressourcen zur Verringerung der Entsorgungskosten.

Ein weiterer Vorteil ist die frühzeitige *Konformität mit Regularien*, die den Umweltschutz betreffen. Durch die Vermeidung des Einsatzes bzw. der Erzeugung von Ressourcen, die eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen, werden spätere, ggf. kostspielige Anpassungen der Fertigung überflüssig. Liegen die Ziele des Unternehmens bezüglich der Ressourceneffizienz höher als die gesetzlichen Anforderungen, so ist davon auszugehen, dass ressourceneffizient geplante Fertigungsprozessketten auch zukünftig den rechtlich geforderten Ansprüchen an eine nachhaltige Produktion entsprechen.

Die Bewertungsmethode ermöglicht zudem ein gezieltes Herausarbeiten von *Ansatzpunkten für Verbesserungsmaßnahmen*. Durch die vielfältigen Analysemöglichkeiten der Ressourcenströme eines Prozesses bzw. einer Prozesskette, die insbesondere das Softwaretool *REvalue* zur Verfügung stellt, können beispielsweise besonders verbrauchsintensive Prozessschritte identifiziert werden. Für diese Prozessschritte und die dort aktiven Verbraucher erfolgt anschließend eine genauere Betrachtung, die zu einer Verbesserung des geplanten Konzepts bzw. der bestehenden Prozesskette führen kann.

Die Erhöhung der Ressourceneffizienz der Produktion eines Unternehmens bewirkt bei geeignetem Marketing i. d. R. eine *Imageverbesserung*. Diese kann wiederum zu weiteren positiven Effekten führen. Werden z. B. die positiven Assoziationen auf die Produkte des Unternehmens übertragen, so kann dies Absatzerhöhungen hervorrufen. Außerdem hat eine sehr gute Reputation ggf. einen positiven Einfluss auf die Mitarbeiterzufriedenheit und -motivation, die sich wiederum auf die Produktivität und den Zugriff des Unternehmens auf qualifizierte Fachkräfte auswirken kann.

Bei all den Vorteilen, die die Wahl der ressourceneffizientesten Alternative mit sich bringt, ist zu berücksichtigen, dass Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit konfligierende Ziele darstellen können. Bezüglich der laufenden Aufwände wird die Betrachtung von Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit, wie oben erwähnt, i. d. R. korrelieren. Die Anfangsinvestition für ein ressourceneffizientes Betriebsmittel kann jedoch höher sein als die für ein weniger ressourceneffizientes Betriebsmittel. Dies kann dazu führen, dass trotz einer lebenszyklusorientierten Wirtschaftlichkeitsrechnung, die ressourceneffizienteste Alternative nicht der wirtschaftlichsten Alternative entspricht. Vor dem Hintergrund der aktuellen Material- und Energiepreisentwicklungen ist jedoch von einer Reduzierung bzw. Auflösung möglicher Zielkonflikte auszugehen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Bei der Forderung nach einer nachhaltigen Entwicklung unserer Gesellschaft kommt der ökologischen Dimension eine besondere Rolle zu. Sie bildet in Form der natürlichen Ressourcen unsere Lebensgrundlage und wird zunehmend über ihre Regenerationsfähigkeit hinaus genutzt. Es gilt daher den Ressourcenverbrauch und dessen Umweltauswirkungen vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln. Die Industrie kann hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten, da neben den Belastungen der natürlichen Ressourcen während der Nutzungsphase eines Produkts auch viele ökologische Auswirkungen von dessen Herstellung ausgehen. Um den Ressourceneinsatz in der Fertigung transparent zu machen und damit eine Steigerung der Ressourceneffizienz zu ermöglichen, bedarf es geeigneter Bewertungskenngrößen, die die bestehenden ökonomischen Kennzahlen ergänzen. Hierfür wurde im Rahmen der Einleitung zunächst ein einheitliches Verständnis bezüglich des Ressourcenverbrauchs in der Fertigung geschaffen.

Die Grundlage jeder ressourcenorientierten Bewertung bildet die Ökobilanzierung. Daher wurden das methodische Vorgehen bei der Erstellung einer Ökobilanz ausgeführt und die bisherigen Anwendungen in der Fertigung beschrieben. Hinsichtlich der traditionellen, für jeden Bereich gültigen Ökobilanzierung zeigte sich, dass sich diese für eine effiziente, aufwandsarme Anwendung in der Fertigung nicht eignet. Die bisherigen Bewertungen im Fertigungsumfeld wiesen ihrerseits entweder Defizite hinsichtlich der Konformität mit der Ökobilanzierung auf oder waren so spezifisch auf einen Anwendungsfall zugeschnitten, dass eine generische Anwendung der Vorgehensweisen für verschiedene Fertigungsprozesse nicht möglich ist.

Motiviert durch die Defizite bestehender Ansätze und die Potentiale eines generischen, anwendungsorientierten Vorgehens wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung entwickelt. Diese basiert auf den allgemeinen Grundsätzen einer Ökobilanzierung und den spezifischen Anforderungen der Fertigungsplanung. Analog zu den Phasen der allgemeinen Ökobilanzierung gliedert sich auch die entwickelte Methode in vier Phasen: In der *ersten Phase* werden die herzustellenden Produktfeatures und die alternativen Prozessketten zur Herstellung dieser Features definiert. Hierdurch wird der Nutzen der Prozesskette klar umrissen und bildet als Bezugsgröße die Grundlage für einen Vergleich alternativer Prozessketten. Zudem erfolgt eine Modellierung der betrachteten Prozessketten, sodass die Bewertungsobjekte und deren Systemgrenzen eindeutig festgelegt sind. Für die Modellierung der Prozessketten wurde eine systemtheoretische

Beschreibung entwickelt, die einen Abstraktionsgrad aufweist, der es ermöglicht, sämtliche Prozessketten der Fertigung und deren Ressourcenströme abzubilden. In der *zweiten Phase* werden die Ressourcenströme modelliert und quantifiziert. Hierzu wurden ein Vorgehen für die Quantifizierung von Ressourcenströmen beschrieben und verschiedene Kategorisierungen zur Verfügung gestellt, die die systematische Bestimmung der auftretenden Energie- und Materialströme unterstützen. Die *dritte Phase* dient der Ableitung charakteristischer Ressourcenfaktoren, die die Auswirkungen der in der Fertigung eingesetzten Ressourcen auf die Umwelt wiedergeben. Für die Ableitung dieser Ressourcenfaktoren wurde eine Kriterienhierarchie entwickelt, die die Ressourceneffizienz einer Ressource wiedergibt. Das Vorgehen zur Bestimmung der Ressourcenfaktoren baut auf dieser Kriterienhierarchie auf und besteht aus zwei multikriteriellen Bewertungsverfahren, die für die Herleitung der Ressourcenfaktoren angepasst wurden. Schließlich werden in der *vierten Phase* Kennzahlen zur quantitativen Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung bestimmt, welche die Ergebnisse der ersten drei Phasen in sich vereinigen. Aufgrund der Unterschiede zwischen materiellen und energetischen Ressourcen wurde jeweils eine eigene Kennzahl abgeleitet. Die übergeordnete Kennzahl zur Beurteilung der Ressourceneffizienz besteht aus der gewichteten Summe der Material- und Energieeffizienz. Die entwickelten Kennzahlen unterstützen produzierende Unternehmen, die aus Sicht der Ressourceneffizienz vorteilhafteste Prozesskette bei mehreren Planungsalternativen auszuwählen.

Die gesamte Methode wurde in Form des Softwaretools *REvalue* umgesetzt, welches den effizienten Einsatz in der Praxis unterstützt, indem es den notwendigen Aufwand der Bewertung reduziert. Anhand eines Vergleichs zweier Prozessketten aus der Fügetechnik wurde die Methode exemplarisch angewendet und validiert. Bei der beschriebenen Fertigungsaufgabe handelt es sich um das Trennen eines Blechs und das anschließende Fügen zu dem Grundkörper eines kleinen Druckluftbehälters. Eine Prozesskette enthält einen Sägeprozess und einen Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißprozess. Die zweite Prozesskette setzt sich ebenfalls aus dem Sägeprozess und einem Rührreibschweißprozess zusammen. Bei der Bewertung stellte sich heraus, dass bei den vorliegenden Alternativen die Prozesskette mit dem Hochleistungsdioden-Laserstrahlschweißprozess aus Sicht der Ressourceneffizienz zu bevorzugen ist. Schließlich erfolgte eine allgemeine Bewertung der Methode, indem diese an initial gestellten Anforderungen gespiegelt wurde. Zusätzlich wurden der auftretende Aufwand bei der Anwendung in der Praxis und der Nutzen der Ressourceneffizienz-Bewertung in der Fertigung erörtert.

## 7.2 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Methode zeigt eine Reihe weiterer Möglichkeiten für Forschungsarbeiten in diesem Themengebiet auf. Die definierten Kennzahlen zur Bewertung der Ressourceneffizienz enthalten ausschließlich den laufenden Ressourcenverbrauch. Der initiale „Ressourceninvest“, also der bei der Herstellung der in der Prozesskette eingesetzten Betriebsmittel verursachte Ressourcenaufwand, wird nicht berücksichtigt. Gerade bei Umplanungen, bei denen ggf. einige Betriebsmittel bereits im Unternehmen vorhanden sind, wäre die Integration des Ressourceninvests allerdings sinnvoll. Zukünftige Arbeiten könnten daher eine Art „Ressourcen-Kapitalwert“ aus initialem und laufendem Ressourcenverbrauch entwickeln, wobei die größte Herausforderung in der Erarbeitung einer Methode zur aufwandsarmen Bestimmung des Ressourceninvests liegt.

Ein weiterer Ansatz wäre die Einbindung der entwickelten Sachbilanzierung für die Fertigung in die Bilanzierung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts. Damit können Teile der Methode in das Vorgehen für die klassische Ökobilanzierung eines Produkts übernommen werden und die häufig vernachlässigten oder schlecht abgeschätzten Ressourcenströme bei der Herstellung in die Bewertung eingebracht werden. Dies würde die notwendige Berücksichtigung der Produktionsphase gewährleisten und damit die Qualität des Bewertungsergebnisses steigern.

Neben der Ökobilanzierung werden für die Berücksichtigung der Ressourceneffizienz in der unternehmerischen Praxis unterschiedliche Kennzahlen für die verschiedenen Bereiche benötigt. Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten Kennzahlen für die Fertigung sollten beispielsweise durch Kennzahlen für den Einkauf und weitere relevante Bereiche ergänzt werden. Für die sinnvolle Definition dieser Kennzahlen sind weitere Forschungsaktivitäten nötig. Zusätzlich müssen auch übergeordnete Konzepte für das Ressourceneffizienz-Controlling des gesamten Unternehmens entwickelt werden, die auf den Kennzahlen der einzelnen Unternehmensbereiche basieren.

Die Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz kann gemeinsam mit Kennzahlen für die sozialen und ökonomischen Komponenten einer Fertigung kombiniert werden. Damit wäre eine gesamthafte Nachhaltigkeitsbewertung in der Fertigung möglich. Es bestehen jedoch insbesondere Defizite bei der Bewertung sozialer Komponenten in der Fertigung, die nicht die Ergonomie betreffen, wodurch auch hier Raum für weitere Arbeiten existiert.





## Literaturverzeichnis

ABELE & EISELE 2010

Abele, E.; Eisele, C.: Energieeffiziente Produktionsmaschinen durch Simulation in der Produktentwicklung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 11, S. 980–983.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011.

ABELE & SCHREMS 2010

Abele, E.; Schrems, S.: Ressourcenorientierte Bewertung alternativer Prozessketten: Herausforderungen und Möglichkeiten zur Prozesskettenbewertung im Produktionsplanungsprozess. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 6, S. 542–546.

ABELE ET AL. 2012

Abele, E.; Schrems, S.; Schraml, P.: Energieeffizienz in der Fertigungsplanung: Frühzeitige Abschätzung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen in der Mittel- und Großserienfertigung. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 1/2, S. 38–42.

ALLAN 1998

Allan, J. A.: Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits. Ground Water 36 (1998) 4, S. 545–546.

ATIK 2001

Atik, A.: Entscheidungsunterstützende Methoden für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. Aachen: Shaker 2001. (Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung).

BARE ET AL. 2000

Bare, J. C.; Hofstetter, P.; Pennington, D. W.; Haes, H. A. U.: Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. The International Journal of Life Cycle Assessment 5 (2000) 6, S. 319–326.

BARE ET AL. 2002

Bare, J. C.; Norris, G.; Pennington, D. W.; McKone, T. E.: Traci: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. Journal of Industrial Ecology 6 (2002) 3/4, S. 49–78.

BAYER 2009

Bayer, W.: Energie auf einen Blick. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2009.

BGR 2010

BGR: Bundesrepublik Deutschland Rohstoffsituation 2009. Hannover 2010. (Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien XXXIX).

BLEY ET AL. 2007

Bley, H.; Bossmann, M.; Weyand, L.; Schmitt, B.: Feature-Technologie in der integrierten Produktentstehung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 102 (2007) 10, S. 681–685.

BOOS & KUHLMANN 2010

Boos, W.; Kuhlmann, K.: Bewertung der Ressourceneffizienz von Werkzeugmaschinen. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 5, S. 350–353.

BRANHAM ET AL. 2008

Branham, M.; Gutowski, T.; Jones, A.; Sekulic, D.: A Thermodynamic Framework for Analyzing and Improving Manufacturing Processes. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. IEEE 2008. S. 1–6.

BRECHER ET AL. 2010

Brecher, C.; Herfs, W.; Heyers, C.; Klein, W.; Triebs, J.; Beck, E.; Dorn, T.: Ressourceneffizienz von Werkzeugmaschinen im Fokus der Forschung: Effizienzsteigerung durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 7/8, S. 559–564.

CARNEGIE MELLON UNIVERSITY 2008

Carnegie Mellon University: EIO-LCA: Free, Fast, Easy Life Cycle Assessment, 2008, <http://www.eiolca.net/index.html>.

CHOI ET AL. 1997

Choi, A. C. K.; Kaebernick, H.; Lai, W. H.: Manufacturing processes modeling for environmental impact assessment. Journal of Materials Processing Technology 70 (1997) 1/3, S. 231–238.

CURRAN 2006

Curran, M. A.: Life Cycle Assessment: Principles and Practice. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency 2006. (EPA 600/R-06/060).

## CURRAN ET AL. 2005

Curran, M. A.; Mann, M.; Norris, G.: The international workshop on electricity data for life cycle inventories. *Journal of Cleaner Production* 13 (2005) 8, S. 853–862.

## DAHMEN ET AL. 2010

Dahmen, M.; Güdükkurt, O.; Kaielerle, S.: The Ecological Footprint of Laser Beam Welding. *Physics Procedia* 5 (2010) 2, S. 19–28.

## DAHMUS &amp; GUTOWSKI 2004

Dahmus, J.; Gutowski, T.: An Environmental Analysis of Machining. In: ASME (Hrsg.): *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Anaheim: ASME 2004. S. 1–10.

## DERA 2011

DERA: Deutschland Rohstoffsituation 2010. Deutsche Rohstoffagentur 2011. (DERA Rohstoffinformationen).

## DEVOLDERE ET AL. 2007

Devoldere, T.; Dewulf, W.; Deprez, W.; Willems, B.; Dufloy, J. R.: Improvement Potentials for Energy Consumption in Discrete Part Production Machines. In: Takata, S.; Umeda, Y. (Hrsg.): *Proceedings of the 14th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Tokyo: Springer 2007. S. 311–316.

## DEVOLDERE ET AL. 2008

Devoldere, T.; Dewulf, W.; Deprez, W.; R., D. J.: Energy Related Life Cycle Impact and Cost Reduction Opportunities in Machine Design: The Laser Cutting Case. In: Kara, S. (Hrsg.): *Proceedings of the 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Sydney: The Conference 2008. S. 412–419.

## DIAZ ET AL. 2010a

Diaz, N.; Helu, M.; Dornfeld, D.: Design and Operation Strategies for Green Machine Tool Development. In: MTTRF (Hrsg.): *Proceedings of MTTRF 2010 Annual Meeting, 2010a*. S. 47–52.

## DIAZ ET AL. 2010b

Diaz, N.; Helu, M.; Jayanathan, S.; Chen, Y.; Horvath, A.; Dornfeld, D.: *Environmental Analysis of Milling Machine Tool Use in Various Manufacturing Environments, 2010b*.

DIAZ ET AL. 2011

Diaz, N.; Redelsheimer, E.; Dornfeld, D.: Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tools. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Berlin: Springer 2011. S. 263–267.

DIETMAIR & VERL 2010

Dietmair, A.; Verl, A.: Energy Consumption Assessment and Optimisation in the Design and Use Phase of Machine Tools. In: Zhang, H.-C.; Liu, Z.; Liu, G. (Hrsg.): Proceedings of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Hefei: University of Technology press 2010. S. 116–121.

DIETMAIR ET AL. 2008

Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile: Eine Methode zur effizienten Erfassung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 7/8, S. 640–645.

DIN 14040 2006

DIN 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz: Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin: Beuth 2006.

DIN 14044 2006

DIN 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz: Anforderungen und Anleitungen. Berlin: Beuth 2006.

DIN 8580 2003

DIN 8580: Fertigungsverfahren. Berlin: Beuth 2003.

DÖRING 2011

Döring, D.: Eine kurze Einführung in die Systemtheorie. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011.

DRAGANESCU ET AL. 2003

Draganescu, F.; Gheorghe, M.; Doicin, C. V.: Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. Journal of Materials Processing Technology 141 (2003) 1, S. 9–15.

DRAKOPOULOS ET AL. 2006

Drakopoulos, S.; Salonitis, K.; Tsoukantas, G.; Chryssolouris, G.: Environmental Impact of Ship Hull Repair. In: Duflou, J. R. (Hrsg.): Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven 2006. S. 459–464.

## DUFLOU &amp; KELLENS 2010

Duflou, J. R.; Kellens, K.: Unit Process Impact Assessment for Discrete Part Manufacturing: A State of the Art. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Auerbach: Wissenschaftliche Scripten 2010. S. 81–98.

## DUFLOU ET AL. 2011

Duflou, J. R.; Kellens, K.; Dewulf, W.: Unit process impact assessment for discrete part manufacturing: A state of the art. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 4 (2011) 2, S. 129–135.

## EAA 2008

EAA: Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry: Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. Brüssel: European Aluminium Association 2008.

## ECKEBRECHT 2000

Eckebrecht, J.: Umweltverträgliche Gestaltung von spanenden Fertigungsprozessen: Forschungsansätze und Wissenstransfer. Aachen: Shaker 2000. (Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen 3).

## EISELE ET AL. 2011

Eisele, C.; Schrems, S.; Abele, E.: Energy-Efficient Machine Tools through Simulation in the Design Process. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Berlin: Springer 2011. S. 258–262.

## EUROPÄISCHE KOMMISSION 2003

Europäische Kommission: Entwicklung einer thematischen Strategie für die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen: KOM(2003) 572. Brüssel: Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2003.

## EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010a

Europäische Kommission: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General guide for Life Cycle Assessment: Detailed guidance. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2010a.

## EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010b

Europäische Kommission: LCA Tools, Services and Data: ELCD core database version II, 2010b, <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm>.

EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010c

Europäische Kommission: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Analysis of Existing Environmental Impact Assessment Methodologies for Use in Life Cycle Assessment: Background document. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2010c.

EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010d

Europäische Kommission: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2010d.

EUROPÄISCHE UNION 2002

Europäische Union: Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten: 2002/95/EG. Brüssel: Europäische Union 2002.

EUROPÄISCHE UNION 2009

Europäische Union: Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte: 2009/125/EG. Brüssel: Europäische Union 2009.

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik: Grundlagen. Düsseldorf: VDI 1996.

EVERSHEIM 1997

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik: Arbeitsvorbereitung. Düsseldorf: VDI 1997.

EVERSHEIM & SCHUH 1999

Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte: Produktion und Management. Berlin: Springer 1999.

EYERER 1996

Eyerer, P.: Ganzheitliche Bilanzierung: Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen. Berlin: Springer 1996.

FALLBÖHMER 2000

Fallböhrer, M.: Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Aachen: Shaker 2000. (Berichte aus der Produktionstechnik 23).

## FIJAL 2007

Fijal, T.: An environmental assessment method for cleaner production technologies. *Journal of Cleaner Production* 15 (2007) 10, S. 914–919.

## FINNVEDEN ET AL. 2009

Finnveden, G.; Hauschild, M. Z.; Ekvall, T.; Guinée, J.; Heijungs, R.; Hellweg, S.; Koehler, A.; Pennington, D.; Suh, S.: Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management* 91 (2009) 1, S. 1–21.

## FORBRIG 2007

Forbrig, P.: *Objektorientierte Softwareentwicklung mit UML*. München: Hanser 2007.

## FRAUNHOFER 2002

Fraunhofer: Druckluft effizient, 2002–2011, <http://www.druckluft-effizient.de>.

## FRISCHKNECHT ET AL. 2008

Frischknecht, R.; Steiner, R.; Jungbluth, N.: *Ökobilanzen: Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren 2006: Methode für die Wirkungsabschätzungen in Ökobilanzen*. Zürich: Öbu -Netzwerk für nachhaltiges Wirtschaften 2008.

## GEITNER 1987

Geitner, U. W.: *Betriebsinformatik für Produktionsbetriebe: Methoden der Produktionsplanung und Steuerung*. München: Hanser 1987.

## GOEDKOOP &amp; SPRIENSMA 2001

Goedkoop, M.; Spriensma, R.: *The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology Report*. Amersfoort: Pré Consultants 2001. (Publikatiereeks produktenbeleid 1999/36A).

## GÖSCHEL ET AL. 2010

Göschel, A.; Sterzing, A.; Schönherr, J.: *Systembetrachtungen von Prozessketten der Blechwarmumformung in Hinblick auf Energie- und Ressourceneffizienz*. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): *Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik*. Auerbach: Wissenschaftliche Scripten 2010. S. 747–767.

## GÖSCHEL ET AL. 2011

Göschel, A.; Sterzing, A.; Schönherr, J.: *Balancing procedure for energy and material flows in sheet metal forming*. *Journal of Manufacturing Science and Technology* 4 (2011) 2, S. 170–179.

GÖTZE 2008

Götze, U.: Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. Berlin: Springer 2008.

GÖTZE ET AL. 2010

Götze, U.; Koriath, H.-J.; Kolesnikov, A.; Lindner, R.; Paetzold J.; Scheffler, C.: Energetische Bilanzierung und Bewertung von Werkzeugmaschinen. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Auerbach: Wissenschaftliche Scripten 2010. S. 157–184.

GUINÉE ET AL. 2002

Guinée, J. B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. d.; van Oers, L.; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Haes, H. A. U. d.; Bruijn, H. d.; van Duin, R.; Huijbregts, M. A. J.: Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards: I: LCA in perspective, IIa: Guide, IIb: Operational annex, III: Scientific background. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers 2002.

GUINÉE ET AL. 2011

Guinée, J. B.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Zamagni, A.; Masoni, P.; Buonamici, R.; Ekvall, T.; Rydberg, T.: Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. Environmental Science & Technology 45 (2011) 1, S. 90–96.

GUTENBERG 1983

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Berlin: Springer 1983.

GUTOWSKI ET AL. 2006

Gutowski, T.; Dahmus, J.; Thiriez, A.: Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. In: Duflou, J. R. (Hrsg.): Proceedings of the 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven 2006. S. 623–627.

GUTOWSKI ET AL. 2007

Gutowski, T.; Dahmus, J.; Thiriez, A.; Branham, M.; Jones, A.: A Thermodynamic Characterization of Manufacturing Processes. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. IEEE 2007. S. 137–142.

GUTOWSKI 2010

Gutowski, T. G.: The efficiency and eco-efficiency of manufacturing. International Journal of Nanomanufacturing 6 (2010) 1/2/3/4, S. 38–45.



## GUTOWSKI ET AL. 2009

Gutowski, T. G.; Branham, M. S.; Dahmus, J. B.; Jones, A. J.; Thiriez, A.; Sekulic, D. P.: Thermodynamic Analysis of Resources Used in Manufacturing Processes. *Environmental Science & Technology* 43 (2009) 5, S. 1584–1590.

## HAES ET AL. 2002

Haes, H. A. U. d.; Finnveden, G.; Goedkoop, M.; Hausschild, M.; Hertwich, E. G.; Hofstetter, P.; Joliet, O.; Klöpffer, W.; Krewitt, W.; Lindeijer, E.; Müller-Wenk, R.; Olsen, S. I.; Pennington, D. W.; Potting, J.; Steen, B.: Life Cycle Impact Assessment: Striving towards best practice. Pensacola: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) 2002.

## HANSEN 1999

Hanssen, O. J.: Status of Life Cycle Assessment (LCA) activities in the Nordic Region. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 4 (1999) 6, S. 315–320.

## HARSCOET &amp; FROELICH 2008

Harscoet, E.; Froelich, D.: Use of LCA to evaluate the environmental benefits of substituting chromic acid anodizing (CAA). *Journal of Cleaner Production* 16 (2008) 12, S. 1294–1305.

## HAUFF &amp; KLEINE 2009

Hauff, M. v.; Kleine, A.: Nachhaltige Entwicklung: Grundlagen und Umsetzung. München: Oldenbourg 2009.

## HAUSSCHILD &amp; POTTING 2005

Hausschild, M.; Potting, J.: Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment: The EDIP2003 methodology. The Danish Environmental Protection Agency 2005. (*Environmental News* 80).

## HEINEN 1992

Heinen, E.: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden: Gabler 1992.

## HIERSIG 1995

Hiersig, H. M.: Lexikon Produktionstechnik: Verfahrenstechnik. Düsseldorf: VDI 1995.

## HOFFMANN ET AL. 2008

Hoffmann, M.; Kayser, G.; Wallau, F.; Krieg, O.; Erren, J.: BDI-Mittelstandspanel: Ergebnisse der Online-Mittelstandsbefragung. Berlin: Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. 2008.

HUNT ET AL. 1998

Hunt, R. G.; Boguski, T. K.; Weitz, K.; Sharma, A.: Case studies examining LCA streamlining techniques. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 3 (1998) 1, S. 36–42.

HWANG & YOON 1981

Hwang, C.-L.; Yoon, K.: *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications : A State-of-the-Art Survey*. Berlin and Heidelberg and New York: Springer-Verlag 1981.

IMF 2010

IMF: *World economic outlook, October 2010: Recovery, risk, and rebalancing*. Washington and D.C: International Monetary Fund 2010.

JOLLIET ET AL. 2003

Jolliet, O.; Margni, M.; Charles, R.; Humbert, S.; Payet, J.; Rebitzer, G.; Rosenbaum, R.: *IMPACT 2002+*: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 8 (2003) 6, S. 324–330.

JOVANE ET AL. 2009

Jovane, F.; Westkämper, E.; Williams, D.: *The ManuFuture Road: Towards competitive and sustainable high-adding-value manufacturing*. Berlin: Springer 2009.

KARA & LI 2011

Kara, S.; Li, W.: Unit process energy consumption models for material removal processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (2011) 1, S. 37–40.

KELLENS ET AL. 2010a

Kellens, K.; Dewulf, W.; Deprez, W.; Yasa, E.; Dufloy, J. R.: Environmental Analysis of SLM and SLS Manufacturing Processes. In: Zhang, H.-C.; Liu, Z.; Liu, G. (Hrsg.): *Proceedings of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Hefei: University of Technology press 2010a. S. 423–428.

KELLENS ET AL. 2010b

Kellens, K.; Yasa, E.; Dewulf, W.; Dufloy, J. R.: Environmental Assessment of Selective Laser Melting and Selective Laser Sintering. In: *Österreichische Gesellschaft für System- und Automatisierungstechnik (Hrsg.): Going Green – CARE INNOVATION 2010, 2010b*.

**KELLENS ET AL. 2012a**

Kellens, K.; Dewulf, W.; Overcash, M.; Hauschild, M. Z.; Dufloy, J. R.: Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI) - CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing): Part 1: Methodology description. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (2012a) 1, S. 69–78.

**KELLENS ET AL. 2012b**

Kellens, K.; Dewulf, W.; Overcash, M.; Hauschild, M. Z.; Dufloy, J. R.: Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI) - CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing): Part 2: Case studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (2012b) 2, S. 242–251.

**KELLENS ET AL. 2012c**

Kellens, K.; Renaldi; Dewulf, W.; Dufloy, J. R.: Environmental impact modelling of discrete part manufacturing processes. In: Dornfeld, D.; Linke, B. (Hrsg.): *Proceedings of the 19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Berlin: Springer 2012c. S. 557–562.

**KIENZLE & VICTOR 1952**

Kienzle, O.; Victor, H.: Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugmaschinen. *VDI-Z* 94 (1952) 11–12, S. 155–171.

**KIRCHHOFF 2006**

Kirchhoff, K. R.: CSR als strategische Herausforderung. In: Gazdar, K.; Habisch, A.; Kirchhoff, K. R.; Vaseghi, S. (Hrsg.): *Erfolgsfaktor Verantwortung*. Berlin: Springer 2006, S. 13–34.

**KLOCKE ET AL. 2008**

Klocke, F.; Lung, D.; Nau, B.: Umweltorientiertes Lebenszyklusmanagement: Bewertung ökologischer Einflüsse und Kostenbetrachtung im Lebenszyklus von Werkzeugmaschinen. *wt Werkstattstechnik online* 98 (2008) 7/8, S. 555–560.

**KLOCKE ET AL. 2010**

Klocke, F.; Schlosser, R.; Tönissen, S.: Prozesseffizienz durch Parameterwahl: Evaluierung des Fräsprozesses. *wt Werkstattstechnik online* 100 (2010) 5, S. 346–349.

**KREBS 2012**

Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. *Utz* 2012. (Forschungsberichte IWB 255).

KRISTOF ET AL. 2008

Kristof, K.; Lemken, T.; Roser, A.; Ott, V.: Untersuchung der Wirksamkeit des Programms zur Verbesserung der Materialeffizienz: AZ I D 4 – 02 08 15. Wuppertal: Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie 2008.

KROTSCHHECK & NARODOSLAWSKY 1996

Krotscheck, C.; Narodoslowsky, M.: The Sustainable Process Index: A new dimension in ecological evaluation. *Ecological Engineering* 6 (1996) 4, S. 241–258.

KUHRKE 2011

Kuhrke, B.: Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen. Berlin: epubli GmbH 2011. (Schriftenreihe des PTW: Innovation Fertigungstechnik).

KUHRKE ET AL. 2010

Kuhrke, B.; Schrems, S.; Eisele, C.; Abele, E.: Methodology to Assess the Energy Consumption of Cutting Machine Tools. In: Zhang, H.-C.; Liu, Z.; Liu, G. (Hrsg.): *Proceedings of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Hefei: University of Technology press 2010. S. 76–82.

LAREK 2012

Larek, R.: Ressourceneffiziente Auslegung von fertigungstechnischen Prozessketten durch Simulation und numerische Optimierung. Aachen: Shaker 2012. (Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen 58).

LEONTIEF 1970

Leontief, W.: Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. *Review of Economics & Statistics* 52 (1970) 3, S. 262.

LI ET AL. 2011

Li, W.; Zein, A.; Kara, S.; Herrmann, C.: An Investigation into Fixed Energy Consumption. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Berlin: Springer 2011. S. 268–273.

LUNDIE & HUPPES 1999

Lundie, S.; Huppel, G.: Environmental assessment of products: The ranges of the societal preferences method. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 4 (1999) 1, S. 7–15.

## MATTHES ET AL. 2010

Matthes, K.-J.; Putz, M.; Todtermuschke, M.; Böhme, J.; Hälsig, A.: Methods and Characteristic Values in Energy Analysis of Handling, Assembling and Joining Processes. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Auerbach: Wissenschaftliche Scripten 2010. S. 483–501.

## MCKINSEY 2009

McKinsey: Wettbewerbsfaktor Energie: Neue Chancen für die deutsche Wirtschaft. Düsseldorf: McKinsey & Company Deutschland 2009.

## MEADOWS ET AL. 2007

Meadows, D.; Randers, J.; Meadows, D.: Grenzen des Wachstums: Das 30-Jahre-Update. Stuttgart: Hirzel 2007.

## MORROW ET AL. 2007

Morrow, W. R.; Qi, H.; Kim, I.; Mazumder, J.; Skerlos, S. J.: Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. *Journal of Cleaner Production* 15 (2007) 10, S. 932–943.

## MÜLLER &amp; LÖFFLER 2009

Müller, E.; Löffler, T.: Improving Energy Efficiency in Manufacturing Plants – Case Studies and Guidelines. In: ElMaraghy, W. (Hrsg.): Proceedings of the 16th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 2009. S. 465–471.

## MÜLLER ET AL. 2010

Müller, E.; Löffler, T.; Tästensen, R.: Ausschreibung und Vergabe energieeffizienter Anlagen: Energieeffizienzkriterien in Lasten- und Pflichtenheften. *wt Werkstattstechnik online* 100 (2010) 5, S. 418–423.

## MÜLLER 2008

Müller, S.: Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. München: Utz 2008. (Forschungsberichte IWB 209).

## MUNOZ &amp; SHENG 1995

Munoz, A. A.; Sheng, P.: An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes. *Journal of Materials Processing Technology* 53 (1995) 3/4, S. 736–758.

## NEUGEBAUER 2008

Neugebauer, R.: Ressourceneffizienz in der Produktion - JETZT! In: Rupprecht, R. (Hrsg.): 9. Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung, 2008. S. 51–58.

NEUGEBAUER 2010

Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik: 1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD, Auerbach: Wissenschaftliche Scripten 2010.

NEUGEBAUER ET AL. 2008

Neugebauer, R.; Westkämper, E.; Klocke, F.; Kuhn, A.; Schenk, M.; Michaelis, A.; Spath, D.; Weidner, E.: Energieeffizienz in der Produktion: Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf: gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung. München: Fraunhofer 2008.

NEUMANN & MORLOCK 2002

Neumann, K.; Morlock, M.: Operations Research. München: Hanser 2002.

NEWMAN ET AL. 2010

Newman, S. T.; Nassehi, A.; Imani-Asrai, R.: Energy Efficient Process Planning for CNC Machining. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik. Auerbach: Wissenschaftliche Scripten 2010. S. 57–79.

OECD 2001

OECD: Environmental Strategy for the First Decade of the 21st Century. Paris: Organisation for Economic Co-operation and development 2001.

OSSIMITZ 2000

Ossimitz, G.: Entwicklung systemischen Denkens. München: Profil 2000.

PLASTICSEUROPE 2011

PlasticsEurope: Life Cycle Inventory datasets (LCI) and Environmental Product Declarations (EPD) for plastics, 2011, <http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/eco-profiles.aspx>.

POLLERT ET AL. 2010

Pollert, A.; Kirchner, B.; Polzin, J. M.: Duden, Wirtschaft von A bis Z: Grundlagenwissen für Schule und Studium, Beruf und Alltag. Mannheim: Duden 2010.

POTTING & HAUSSCHILD 2005

Potting, J.; Hausschild, M.: Background for spatial differentiation in LCA impact assessment: The EDIP2003 methodology. Kopenhagen: The Danish Environmental Protection Agency 2005. (Environmental Project 996).

## PUSAVEC ET AL. 2010

Pusavec, F.; Krajnik, P.; Kopac, J.: Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies. *Journal of Cleaner Production* 18 (2010) 2, S. 174–184.

## RAHIMIFARD ET AL. 2010

Rahimifard, S.; Seow, Y.; Childs, T.: Minimising Embodied Product Energy to Support Energy Efficient Manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 59 (2010) 1, S. 25–28.

## RAJEMI ET AL. 2010

Rajemi, M. F.; Mativenga, P. T.; Aramcharoen, A.: Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations. *Journal of Cleaner Production* 18 (2010) 10/11, S. 1059–1065.

## REBITZER ET AL. 2004

Rebitzer, G.; Ekvall, T.; Frischknecht, R.; Hunkeler, D.; Norris, G.; Rydberg, T.; Schmidt, W.-P.; Suh, S.; Weidema, B. P.; Pennington, D. W.: Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International* 30 (2004) 5, S. 701–720.

## REFA 1978

REFA: Methodenlehre des Arbeitsstudiums 2: Datenermittlung. München: Hanser 1978.

## REFA 1993

REFA: Lexikon der Betriebsorganisation: Methodenlehre der Betriebsorganisation. München: Hanser 1993.

## REINHARDT ET AL. 2012

Reinhardt, S.; Fischl, M.; Reinhart, G.: Characterization and Weighting Scheme to Assess the Resource Efficiency of Manufacturing Process Chains. In: Dornfeld, D.; Linke, B. (Hrsg.): *Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*. Berlin: Springer 2012. S. 509–514.

## REINHART &amp; SCHINDLER 2010

Reinhart, G.; Schindler, S.: Reife von Produktionstechnologien: Konzeptionelle Bestimmung des Entwicklungsstadiums von Fertigungsverfahren und -prozessen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010) 7/8, S. 710–714.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Greitemann, J.; Schindler, S.: Strategische Frühaufklärung und Auswahl von Technologieketten für die Produktion. In: Gausemeier, J. (Hrsg.): 8. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung. Paderborn: W.V. Westfalia Druck GmbH 2012. S. 355–372.

RENALDI ET AL. 2011

Renaldi; Kellens, K.; Dewulf, W.; Dufflou, J. R.: Exergy Efficiency Definitions for Manufacturing Processes. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Berlin: Springer 2011. S. 329–334.

RITTHOFF ET AL. 2002

Ritthoff, M.; Rohn, H.; Liedtke, C.: MIPS berechnen: Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen. Wuppertal: Wuppertal Institut 2002. (Wuppertal spezial 27).

ROELANT ET AL. 2004

Roelant, G. J.; Kempainen, A. J.; Shonnard, D. R.: Assessment of the Automobile Assembly Paint Process for Energy, Environmental, and Economic Improvement. *Journal of Industrial Ecology* 8 (2004) 1/2, S. 173–191.

ROGALL 2008

Rogall, H.: *Ökologische Ökonomie: Eine Einführung*. Wiesbaden: VS, Verlag für Sozialwissenschaften 2008.

ROPOHL 1979

Ropohl, G.: *Eine Systemtheorie der Technik: Zur Grundlegung der allgemeinen Technologie*. München: Hanser 1979.

RUPP ET AL. 2007

Rupp, C.; Queins, S.; Zengler, B.: *UML 2 glasklar: Praxiswissen für die UML-Modellierung*. München: Hanser 2007.

SAATY 1990

Saaty, T. L.: *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. Pittsburgh: RWS Publications 1990.

SAATY 2005

Saaty, T. L.: *The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making*. In: Figueira, J.; Greco, S.; Ehrgott, M. (Hrsg.): *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. New York: Springer 2005, S. 345–407.



## SANTOS ET AL. 2011

Santos, J. P.; Oliveira, M.; Almeida, F. G.; Pereira, J.; Reis, A.: Improving the environmental performance of machine tools: influence of technology and throughput on electrical energy consumption of a press-brake. *Journal of Cleaner Production* 19 (2011) 4, S. 356–364.

## SAUERBIER 1999

Sauerbier, T.: *Theorie und Praxis von Simulationssystemen*. Wiesbaden: Vieweg 1999.

## SCHIEFER 2001

Schiefer, E.: *Ökologische Bilanzierung von Bauteilen für die Entwicklung umweltgerechter Produkte am Beispiel spanender Fertigungsverfahren*. Aachen: Shaker 2001. (Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung).

## SCHLOSSER ET AL. 2011

Schlosser, R.; Klocke, F.; Döbbeler, B.; Riemer, B.; Hameyer, K.; Herold, T.; Zimmermann, W.; Nuding, O.; Schindler, B. A.; Niemczyk, M.: Assessment of Energy and Resource Consumption of Processes and Process Chains within the Automotive Sector. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Berlin: Springer 2011. S. 45–50.

## SCHMIDT-BLEEK &amp; BEHRENSMEIER 1998

Schmidt-Bleek, F.; Behrensmeier, R.: *MAIA: Einführung in die Material-Intensitäts-Analyse nach dem MIPS-Konzept*. Basel: Birkhäuser 1998.

## SCHMITT ET AL. 2011

Schmitt, R.; Bittencourt, J. L.; Bonefeld, R.: Modelling Machine Tools for Self-Optimization of Energy Consumption. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Berlin: Springer 2011. S. 253–257.

## SCHNEEWEISS 1991

Schneeweiß, C.: *Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen*. Berlin: Springer 1991.

## SCHREMS ET AL. 2011

Schrems, S.; Eisele, C.; Abele, E.: Methodology for an Energy and Resource Efficient Process Chain Design. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Berlin: Springer 2011. S. 299–304.

SCHUH & KLAPPERT 2011

Schuh, G.; Klappert, S.: Handbuch Produktion und Management: Technologiemanagement. Berlin: Springer 2011.

SCHÜTZ & BRINGEZU 2008

Schütz, H.; Bringezu, S.: Ressourcenverbrauch von Deutschland – aktuelle Kennzahlen und Begriffsbestimmungen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt 2008. (UBA-FB 001103).

SHENG ET AL. 1995

Sheng, P.; Srinivasan, M.; Kobayashi, S.: Multi-Objective Process Planning in Environmentally Conscious Manufacturing: A Feature-Based Approach. CIRP Annals - Manufacturing Technology 44 (1995) 1, S. 433–437.

SHENG ET AL. 1998

Sheng, P.; Bennet, D.; Thurwachter, S.; Turkovich, B. F. v.: Environmental-Based Systems Planning for Machining. CIRP Annals - Manufacturing Technology 47 (1998) 1, S. 409–414.

STEEN 1999

Steen, B.: A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 - General system characteristics. Chalmers: Chalmers University of Technology 1999.

STERR & LIESEGANG 2003

Sterr, T.; Liesegang, D. G.: Industrielle Stoffkreislaufwirtschaft im regionalen Kontext: Betriebswirtschaftlich-ökologische und geographische Betrachtungen in Theorie und Praxis. Berlin: Springer 2003.

STEVEN ET AL. 1997

Steven, M.; Schwarz, E. J.; Letmathe, P.: Umweltberichterstattung und Umwelterklärung nach der EG-Ökoaudit-Verordnung: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Berlin: Springer 1997.

STIENS 2000

Stiens, H.: Ermittlung des gesamtheitlichen Wirkungsgrades als Kennzahl zur rationellen Energienutzung in der Produktionstechnik. Aachen: Shaker 2000. (Umformtechnische Schriften 95).

STOBBE 1994

Stobbe, A.: Volkswirtschaftliches Rechnungswesen. Berlin: Springer 1994.

SUH 1990

Suh, N. P.: The Principles of Design. New York: Oxford University Press 1990.

## SUH 2005

Suh, N. P.: Complexity: Theory and Applications. Oxford: Oxford University Press 2005.

## SUH &amp; HUPPES 2005

Suh, S.; Huppess, G.: Methods for Life Cycle Inventory of a product. Journal of Cleaner Production 13 (2005) 7, S. 687–697.

## TNS 2010

TNS: Discover BRIC. London: TNS Global 2010.

## TODD &amp; CURRAN 1999

Todd, J. A.; Curran, M. A.: Streamlined Life-Cycle Assessment: A Final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup. Pensacola: Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) 1999.

## TROMMER 2001

Trommer, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Aachen: Shaker 2001. (Berichte aus der Produktionstechnik 15).

## UBA 2008

UBA: Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas), 2008, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>.

## UHLMANN 2008

Uhlmann, E.: Ressourceneffizienz in der Produktion. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 7/8, S. 524.

## UNITED NATIONS 2009

United Nations: World population prospects: The 2008 revision. New York: United Nations 2009.

## VDI 2218 2003

VDI 2218: Feature-Technologie. Berlin: Beuth 2003. (ICS 03.100.40).

## VDI 4600 1997

VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand: Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Berlin: Beuth 1997. (ICS 01.040.27).

## VDI 4600 2012

VDI 4600: Kumulierter Energieaufwand: Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Berlin: Beuth 2012. (ICS 01.040.27).

VDI 4661 2003

VDI 4661: Energiekenngrößen. Berlin: Beuth 2003. (ICS 01.040.27).

VOLK 2001

Volk, R.: Handbuch Umweltcontrolling. München: Vahlen 2001.

VÖLLNER 2010

Völlner, G.: Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern. München: Utz 2010. (Forschungsberichte IWB 235).

WACKERNAGEL & REES 1996

Wackernagel, M.; Rees, W.: Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island: New Society Publishers 1996.

WCED 1987

WCED: Our Common Future. Oxford: World Commission on Environment and Development 1987.

WEGNER ET AL. 2010

Wegner, H.; Lung, D.; Nau, B.; Schlosser, R.: Bewertung und Bilanzierung von Fertigungsprozessen und Fertigungsverkettungen. In: Eversheim, W.; Pfeifer, T.; Weck, M.; Brecher, C.; Schmitt, R. H.; Schuh, G. (Hrsg.): Ressourceneffiziente Produktionstechnik – ein Aachener Modell. Aachen: Apprimus 2010.

WEINERT 2010a

Weinert, N.: Planung energieeffizienter Produktionssysteme. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010a) 5, S. 503–507.

WEINERT 2010b

Weinert, N.: Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Stuttgart: Fraunhofer 2010b. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

WEINERT ET AL. 2011

Weinert, N.; Chiotellis, S.; Seliger, G.: Methodology for Planning and operating energy-efficient production systems. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60 (2011) 1, S. 41–44.

WEITZ ET AL. 1996

Weitz, K. A.; Todd, J. A.; Curran, M. A.; Malkin, M. J.: Streamlining Life Cycle Assessment: Considerations and a report on the state of practice. The International Journal of Life Cycle Assessment 1 (1996) 2, S. 79–85.

WEIZSÄCKER ET AL. 2010

Weizsäcker, E. U. v.; Hargroves, K.; Smith, M. H.; Desha, C.; Stasinopoulos, P.: Faktor Fünf: Die Formel für nachhaltiges Wachstum. München: Droemer 2010.

WESTKÄMPER ET AL. 2006

Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.; Decker, M.: Einführung in die Ferti-  
gungstechnik. Wiesbaden: Teubner 2006.

WIESMETH 2002

Wiesmeth, H.: Umweltökonomie: Theorie und Praxis im Gleichgewicht.  
Berlin: Springer 2002.

WORLD STEEL ASSOCIATION 2010

World Steel Association: Life cycle inventory study for steel  
products, 2010, [http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/  
life-cycle-assessment.html](http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/life-cycle-assessment.html).

WWF 2010

WWF: Living Planet Report 2010: Biodiversity, biocapacity and develop-  
ment. Gland: WWF International 2010.

YEO & NEO 1998

Yeo, S. H.; Neo, K. G.: Inclusion of environmental performance for decision  
making of welding processes. Journal of Materials Processing Technology  
82 (1998) 1/3, S. 78–88.



## Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) in den Jahren von 2009 bis 2011 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen verschiedene Fragestellungen zur Ressourceneffizienz in der Produktion untersucht wurden und deren Ergebnisse in Teilen in das vorliegende Dokument eingeflossen sind. Die Autorin dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

---

<b>Studierende(r)</b>	<b>Studienarbeit</b>
Distel F.	Modellierung der Ressourcenströme von Fertigungsprozessen am Beispiel fügender Fertigungsverfahren, abgegeben im April 2011.
Fischl M.	Charakterisierung und Gewichtung von Ressourcen zur Ressourceneffizienz-Bewertung von Fertigungsprozessen, abgegeben im Januar 2011.
Hauptvogel A.	Analyse und Bewertung der beim Spanen und Schweißen eingesetzten Ressourcen, abgegeben im Januar 2010.
Lehner S.	Bewertung der Energie- und Ressourcenverbräuche in der Oberflächentechnik, abgegeben im Juni 2011.
Sager B.	Entwicklung einer Methodik zur energieproduktiven Planung der Fabrikstruktur sowie des Gesamtsystems, abgegeben im Januar 2011.
Schabert A.	Life cycle assessment of fuel cell components, abgegeben im März 2011.
Sick J.	Charakterisierung und Bewertung natürlicher Ressourcen, abgegeben im Mai 2011.
Tenhaeff V.	Konzeption einer Methode zur Analyse, Bewertung und Optimierung der Energieproduktivität in der Achsfertigung, abgegeben im Mai 2011.

---





## A Analyse der MADM-Verfahren

In diesem Abschnitt erfolgt ein Vergleich der MADM-Verfahren mit kardinalen Informationen über die Kriterien und mit Substitutionsraten, die in Abbildung 49 auf S. 117 aufgeführt wurden. Eine Übersicht zu den einzelnen Verfahren und ihren Charakteristiken gibt Tabelle 17. Betrachtet werden das Anwendungsfeld, die nachzuweisenden Voraussetzungen, die Art der Ziel- bzw. Kriterienstruktur, die Gewichtung- und Bewertungsmethoden sowie das erzielte Ergebnis. Des Weiteren wird ein Überblick über den notwendigen Befragungs- und Berechnungsaufwand der einzelnen Verfahren gegeben.

Werden die einzelnen Verfahren unter dem Aspekt der nachzuweisenden *Voraussetzungen* betrachtet, so ist evident, dass die Verfahren ELECTRE<sup>36</sup> und PROMETHEE I große Praxistauglichkeit besitzen. Im Rahmen ihrer Anwendung müssen keine speziellen Eigenschaften nachgewiesen werden. PROMETHEE I lässt sogar Unvergleichbarkeiten zwischen Kriterien zu. Ohne die nachgewiesenen Voraussetzungen von Vollständigkeit und Transitivität kann allerdings keine schwache Ordnung und damit keine Rangfolge von Alternativen garantiert werden. Eine Absicherung der Rangfolge ist jedoch vor dem Hintergrund der Ableitung eines quantitativen Ressourcenfaktors von größter Wichtigkeit. Eine reine Vorauswahl von guten Ressourcen erfüllt diesen Zweck nicht. Die Methoden ELECTRE und PROMETHEE I eignen sich aus diesem Grund nicht für eine Integration in das entwickelte Bewertungsverfahren und werden daher für die weitere Verwendung ausgeschlossen. Bei allen anderen Methoden, inklusive PROMETHEE II, werden als Voraussetzungen Vollständigkeit und Transitivität verlangt und es kann, wie gewünscht, ein abgesichertes Ranking gebildet werden. Die Multi-Attribute Value Theory (MAVT) und die Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) besitzen zudem weitere Anforderungen, nämlich Präferenz- und Nutzenunabhängigkeit, welche bei Nachweis eine Vereinfachung ihrer Aggregationsformeln ermöglichen. Der Nachweis stellt jedoch einen großen Aufwand dar, so dass eine weitere Verwendung der beiden Methoden in Frage zu stellen ist. Die Prüfung der Erfüllung der Konsistenzanforderung bei AHP, ANP und TOPSIS gestaltet sich dagegen relativ einfach. Aus diesem Grund sind der Analytic Hierarchy Process (AHP), der Analytic Network Process (ANP) und die Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) hinsichtlich der zu erfüllenden Voraussetzungen für eine Integration in die Bewertungsmethode die zu bevorzugenden Verfahren.

---

<sup>36</sup> ELECTRE steht als Akronym für ELimination Et Choix Traduisant la REalité (engl.: Elimination and Choice Expressing Reality) und PROMETHEE für Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations.

Tabelle 17: Übersicht der analysierten multikriteriellen Bewertungsverfahren

	AHP	ANP	TOPSIS	ELECTRE	PROMETHEE I	PROMETHEE II	MAVT	MAUT
<b>Anwendungsfeld</b>								
Sicherheit	●	●	●	●	●	●	●	○
Unsicherheit (Risiko)	○	○	○	○	○	○	○	●
<b>Voraussetzungen</b>								
Vollständigkeit und Transitivität	●	●	●	○	○	●	●	●
Konsistenz der Paarvergleiche	●	●	●	○	○	○	○	○
Präferenzunabhängigkeit	○	○	○	○	○	○	●	●
Nutzenunabhängigkeit	○	○	○	○	○	○	○	●
<b>Ziel- bzw. Kriterienstruktur</b>								
Ebene	○	○	●	●	●	●	●	●
Hierarchie	●	○	○	○	○	○	○	○
Netzwerk	○	●	○	○	○	○	○	○
<b>Art der Kriterien</b>								
quantitativ	●	●	●	●	●	●	●	●
qualitativ	●	●	○	○	○	○	○	○
<b>Bestimmung der Artenpräferenz</b>								
direkte Gewichtung mit Normierung	○	○	●	●	●	●	○	○
paarweiser Vergleich mit Normierung	○	○	●	●	●	●	○	○
gewichtete Methode der kleinsten Quadrate	○	○	●	●	●	●	○	○
Eigenwertmethode	●	●	●	●	●	●	○	○
Indifferenzurteile	○	○	○	○	○	○	●	●
<b>Bestimmung der Höhenpräferenz</b>								
paarweiser Vergleich	○	○	○	○	○	○	○	○
Absolutwerte	●	●	●	●	○	○	○	○
Präferenzfunktion	○	○	○	○	●	●	○	○
Nutzen-/Wertfunktion	○	○	○	○	○	○	●	●

	AHP	ANP	TOPSIS	ELECTRE	PROMETHEE I	PROMETHEE II	MAVT	MAUT
<b>Ergebnis</b>								
Rangfolge	●	●	●	◐	◐	●	●	●
relative Vorteilhaftigkeit	●	●	●	●	●	●	●	●
ansolute Vorteilhaftigkeit	○	○	○	○	○	○	●	●
<b>Befragungsaufwand</b>								
hoch	○	○	○	○	○	○	●	●
mittel	●	●	○	○	○	○	○	○
gering	○	○	●	●	●	●	○	○
<b>Rechenaufwand</b>								
hoch	◐	◐	○	○	○	○	○	●
mittel	●	●	●	●	●	●	●	○
gering	○	○	○	○	○	○	○	○
○	trifft nicht zu							
◐	trifft teilweise zu							
●	trifft voll zu							

Mit Blick auf die *Kriterienstruktur* entspricht der AHP mit seiner Zielhierarchie der Struktur der ermittelten Ressourceneffizienz-Kriterien aus Abschnitt 5.3.1.2. Prinzipiell könnten auch alle anderen Strukturen verwendet werden. Die Netzwerkstruktur scheint jedoch für den Fall der Ableitung eines Ressourcenfaktors nicht angebracht, da in der Einflussanalyse (vgl. Abschnitt 5.3.1.3) nur wenige Wechselwirkungen aufgefunden werden konnten. Bei den Verfahren mit ebenen Strukturen herrscht die Gefahr einer übermäßigen Reduktion und eines daraus folgenden Informationsverlusts. Sie sind daher nur bedingt für den geforderten Zweck geeignet.

Hinsichtlich der Art der berücksichtigten *Kriterien* sind der AHP und der ANP zu favorisieren. Sie berücksichtigen als einzige Verfahren quantitative und qualitative Kriterien. Eine Übersetzung der qualitativen Kriterien in einen Zahlenwert ist jedoch auch bei vielen anderen Verfahren über Expertenabschätzungen erzielbar. Lediglich bei den Verfahren mit Substitutionsraten existiert diese Möglichkeit nicht, da eine Wert- bzw. Nutzenfunktion mittels Indifferenzurteilen zu erstellen ist. Die Bildung von Indifferenzurteilen ist für den Fall des

Ausgleichs zwischen von Natur aus unscharfen Aussagen, wie beispielsweise „gut“, „mittel“ oder „schlecht“, und quantitativen Kriterien nicht sinnvoll.

Bezüglich der *Gewichtungsmethode* sind diejenigen Verfahren zu präferieren, welche die Eigenwertmethode nutzen. Sie gibt das Verhältnis und die Bedeutung der Kriterien einer hierarchischen Struktur am besten wieder. Die gewichtete Methode der kleinsten Quadrate ist optimal für ebene Strukturen oder kleine Hierarchien, die auf eine Ebene reduziert werden können. Sie könnte prinzipiell auch Anwendung finden, wird jedoch im Weiteren nicht betrachtet, da die Eigenwertmethode die bevorzugte Option darstellt. MAVT und MAUT benutzen zur Gewichtung Skalenfaktoren, die über Indifferenzurteile ermittelt werden. Die Generierung der Skalenfaktoren ist allerdings mit einem großen Befragungsaufwand verbunden. Aufgrund dessen sowie wegen des ebenfalls sehr arbeitsaufwändigen Nachweises der Voraussetzungen werden MAVT und MAUT nicht weiter in Betracht gezogen (vgl. Tabelle 18).

Tabelle 18: Eignung der Verfahren zur Bewertung der Ressourceneffizienz-Kriterien hinsichtlich der genannten Beurteilungskriterien

	AHP	ANP	TOPSIS	ELECTRE	PROMETHEE I	PROMETHEE II	MAVT	MAUT
Voraussetzungen	●	●	●	○	○	●	◐	◐
Ziel- bzw. Kriterienstruktur	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Art der Kriterien	●	●	●	●	●	●	◐	◐
Bestimmung der Artenpräferenz	●	●	●	●	●	●	○	○
Bestimmung der Höhenpräferenz	●	●	●	◐	◐	◐	●	●
Ergebnis	◐	◐	●	○	○	○	◐	◐
Befragungsaufwand	◐	◐	●	●	●	●	○	○
Rechenaufwand	●	●	●	●	●	●	●	◐
Integration in das neue Verfahren	ja	nein	ja					
○	ausgeschlossenes Verfahren							
◐	akzeptiertes Verfahren							
●	präferiertes Verfahren							

AHP, ANP und TOPSIS bieten, bezogen auf die *Bewertungsmethode*, einen großen Vorteil. Alle drei arbeiten mit direkten Ausprägungen der Kriterien. Auf eine Umwandlung der Ausprägungen bzw. Ausprägungsunterschiede in Präferenzen (vgl. PROMETHEE) oder einen Besser-Schlechter-Vergleich, wie er bei ELECTRE zum Einsatz kommt, wird verzichtet. Auf diese Weise wird der Informationsverlust hinsichtlich der Höhenpräferenz minimal gehalten. AHP, ANP und TOPSIS erhalten daher den Status der zu präferierenden Methoden. Auch die Bewertungsmethoden von MAVT und MAUT stellen direkte Methoden ohne Informationsverlust dar und sind im Hinblick auf die Bewertungsmethode präferierte Methoden. Aufgrund des vorangegangenen Ausschlusses dieser Verfahren wird jedoch an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

Hinsichtlich des Beurteilungskriteriums des *Ergebnisses* des Verfahrens stellen MAUT und MAVT gute Methoden dar. Da sie jedoch, wie bereits erläutert, ausgeschlossen wurden, kann auch hier auf eine tiefergehende Betrachtung verzichtet werden. AHP und ANP sind ebenfalls gute Methoden. Sie generieren Nutzwerte und somit, wie gewünscht, quantitativ aussagekräftige Werte, die nur noch auf das Intervall zwischen Null und Eins normiert werden müssen. TOPSIS geht noch einen Schritt weiter. Es beinhaltet bereits die Normierung und fordert die Benennung einer Ideal-Lösung, welche es anzustreben gilt. Mittels TOPSIS ist es daher möglich, definierte Ideal-Ressourcen in das Verfahren zur Bewertung der Ressourceneffizienz-Kriterien zu integrieren und somit eine allgemeine Vergleichbarkeit von Ressourcen zu erzielen. Im Gegensatz dazu stehen die PROMETHEE-Methoden und das bereits ausgeschlossene Verfahren ELECTRE. Als Ergebnis erzeugen sie lediglich Aussagen, ob eine Alternative dominierend bzw. besser als eine andere ist. Da keine quantitativ aussagekräftigen Werte generiert werden, kann PROMETHEE II ebenfalls von einer weiteren Bearbeitung ausgeschlossen werden.

Der *Befragungsaufwand* von MAVT und MAUT wurde bereits hinsichtlich der genutzten Gewichtungsmethode diskutiert. Er ist bei diesen beiden Verfahren außerordentlich hoch. Alle anderen Verfahren sind als weitestgehend gleichwertig einzustufen (vgl. Tabelle 17). Auch der Rechenaufwand ist in Tabelle 17 dargestellt. Da alle Methoden bis auf MAUT etwa denselben Aufwand zur Berechnung besitzen, werden sie bezüglich dieses Aspektes alle als präferierte Methoden bewertet. Abschließend lässt sich festhalten, dass lediglich die Methoden TOPSIS, AHP und ANP zur Ermittlung der Ressourcenfaktoren verbleiben. TOPSIS weist die meisten positiven Aspekte hinsichtlich der Beurteilungskriterien auf (vgl. Tabelle 18) und bietet besondere Vorteile hinsichtlich der Bestimmung der Höhenpräferenz. Da der AHP am besten die hierarchische Struktur widerspiegelt und in Kombination mit der Eigenwertmethode auch die Gewichtung einer Hierarchie ermöglicht, wird auch er in das Verfahren zur Bestimmung der Ressourcenfaktoren integriert. Der ANP besitzt ähnliche

Vorteile wie der AHP. Er findet jedoch keine weitere Anwendung, da bei den Ressourceneffizienz-Kriterien eine hierarchische und keine Netzwerkstruktur vorliegt.

## B Ausführungen zur exemplarischen Anwendung

### B.1 Messungen

Die Werte der energetischen Ressourcenflüsse entsprechen den durchschnittlichen Messwerten, die durch mehrfache Leistungsmessungen von Referenzprozessen ermittelt wurden (vgl. Abbildung 62, Abbildung 63 und Abbildung 64). Bei den mit Drehstrom versorgten Verbrauchern wurden diese Messungen mithilfe eines Fluke 435 Leistungsmessgeräts der Firma Fluke Deutschland GmbH durchgeführt, welches für die Wirkleistung einen maximalen Messfehler von 1 % aufweist. Um die gesamten Verluste des jeweiligen Verbrauchers berücksichtigen zu können, wurden die Messungen direkt am Netzanschluss durchgeführt. Für die Messung der Wirkleistung von Wechselstrom-Verbrauchern wurde der Voltcraft Energy Monitor 3000 der Firma Conrad Electronic SE verwendet. Die Messgenauigkeit des Voltcraft Energy Monitor 3000 liegt bei  $\pm(1\% + 1\text{ W})$  und einer Auflösung von 0,1 W.

Für die Bestimmung der Massen einzelner Materialien wurde eine Präzisionswaage vom Typ GP 4102 der Firma Sartorius AG mit einer Messgenauigkeit von 0,01 g verwendet. Die Masse von Gasen und einigen Betriebsstoffen wurde über deren Dichte und das jeweilige Volumen bestimmt.

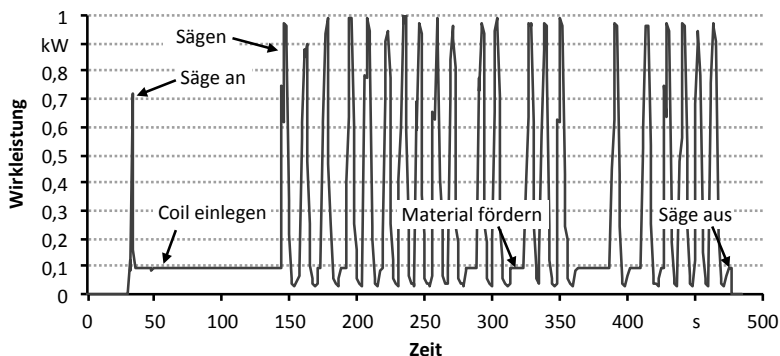


Abbildung 62: Repräsentative Messung der Wirkleistung einer Metallsäge mit automatisierter Blechförderung

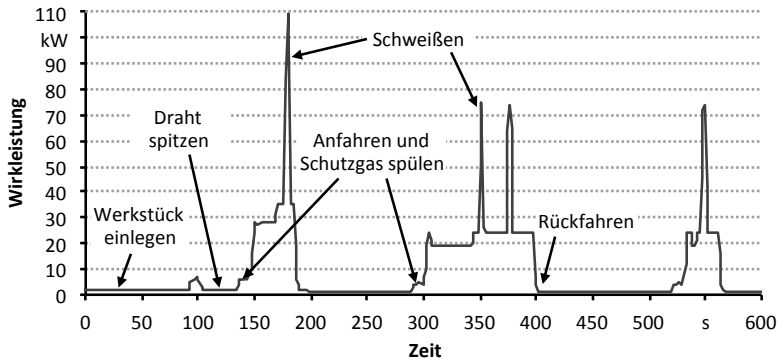


Abbildung 63: Repräsentative Messung der Wirkleistung einer Laseranlage bei der Durchführung eines Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißprozesses

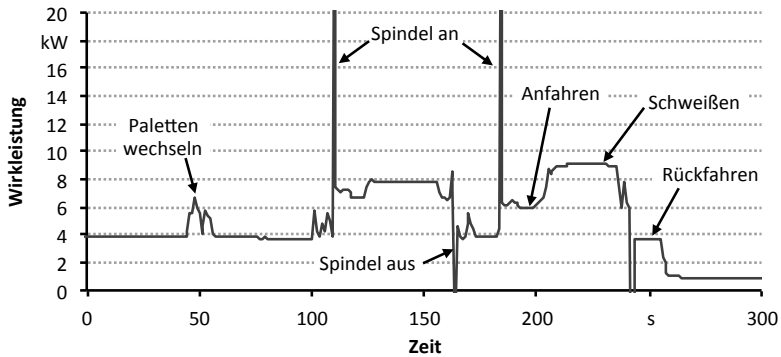


Abbildung 64: Repräsentative Messung der Wirkleistung einer Werkzeugmaschine bei der Durchführung eines Rührreibschweißprozesses

## B.2 Globale Kriteriengewichte

Die lokalen und globalen Gewichte der Ressourceneffizienz-Kriterien für Input- und Output-Ressourcen sind in Tabelle 19 und Tabelle 20 aufgelistet.



Tabelle 19: Lokale und globale Gewichte der Ressourceneffizienz-Kriterien für Input-Ressourcen

<b>Input-Kriterium</b>	<b>lokales Gewicht <math>w_k</math></b>	<b>globales Gewicht <math>c_k</math></b>
nachhaltige Verfügbarkeit	0,528743824	0,528743824
physische Verfügbarkeit	0,142857143	0,075534832
statische Reservenreichweite	1	0,075534832
wirtschaftliche Verfügbarkeit	0,857142857	0,453208992
Importanteil	0,333333333	0,151069664
Durchschnitt WGI	0,333333333	0,151069664
Herfindalindex	0,333333333	0,151069664
ressourcenschonende Zusammensetzung	0,071811893	0,071811893
Recyclinganteil	1	0,071811893
verbrauchsarme(r)	0,234305877	0,234305877
Gewinnung/Veredelung/Antransport		
verbrauchsarme Gewinnung/Veredelung	0,75	0,175729408
KEA	0,428571429	0,075312603
abiotische MI	0,428571429	0,075312603
virtuelles Wasser	0,142857143	0,025104201
verbrauchsarmer Antransport	0,25	0,058576469
KEA	1	0,058576469
geringes Schädigungspotential	0,165138407	0,165138407
Süßwasser-Ökotoxizität	0,09520973	0,015722783
Meerwasser-Ökotoxizität	0,067825744	0,011200635
Erdboden-Ökotoxizität	0,185870553	0,030694367
Humantoxizität	0,651093972	0,107520621

Tabelle 20: Lokale und globale Gewichte der Ressourceneffizienz-Kriterien für Output-Ressourcen

<b>Input-Kriterium</b>	<b>lokales Gewicht <math>w_k</math></b>	<b>globales Gewicht <math>c_k</math></b>
Ermöglichung der Ressourcenschonung	0,095337729	0,095337729
recyclingfähiger Anteil	1	0,095337729
verbrauchsarme(r)	0,249855533	0,249855533
Antransport/Trennung/Entsorgung		
verbrauchsarmer Abtransport	0,25	0,062463883
KEA	1	0,062463883
verbrauchsarme Trennung/Entsorgung	0,75	0,18739165
KEA	1	0,18739165
geringes Schädigungspotential	0,654806738	0,654806738
Schädigung des Menschen	0,75	0,491105053
akute orale Toxizität	0,428571429	0,210473594
Inhalationstoxizität	0,428571429	0,210473594
Hautreizung	0,142857143	0,070157865
Schädigung der Umwelt	0,25	0,163701684
Wassergefährdungsklasse	0,75	0,122776263
biologische Abbaubarkeit	0,25	0,040925421

### B.3 Ausprägungen der Ressourcen

Die Ausprägungen von Input-Ressourcen bezüglich der relevanten Attribute sind in Tabelle 21, Tabelle 22, Tabelle 23, Tabelle 24, Tabelle 25 und Tabelle 26 zusammengefasst. Die Werte entstammen Expertenschätzungen, den integrierten Datenbanken der GaBi Software, der ecoinvent-Datenbank sowie den in DERA (2011) angegebenen Daten.

Tabelle 21: Ausprägungen von elektrischer Energie bezüglich der Input-Attribute

Ressource	Kriterium	Zusammensetzung	Werte	Ausprägung
elektrische Energie	statische Reservenreichweite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 % Braunkohle</li> <li>• 18 % Uran</li> <li>• 19 % Steinkohle</li> <li>• 14 % Erdgas</li> <li>• 20 % erneuerbare Energien</li> <li>• 5 % Heizöl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 200 a</li> <li>• 68 a</li> <li>• 169 a</li> <li>• 63 a</li> <li>• 681 a</li> <li>• 42 a</li> </ul>	gewichteter Durchschnitt 241,47 a
	Importanteil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 % Braunkohle</li> <li>• 18 % Uran</li> <li>• 19 % Steinkohle</li> <li>• 14 % Erdgas</li> <li>• 20 % erneuerbare Energien</li> <li>• 5 % Heizöl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 %</li> <li>• 0 %</li> <li>• 77 %</li> <li>• 87 %</li> <li>• 0 %</li> <li>• 97,7 %</li> </ul>	gewichteter Durchschnitt 31,7 %
	Durchschnitt WGI	-	-	-0,74
	Herfindal-Index	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 % Braunkohle</li> <li>• 18 % Uran</li> <li>• 19 % Steinkohle</li> <li>• 14 % Erdgas</li> <li>• 20 % erneuerbare Energien</li> <li>• 5 % Heizöl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,27</li> <li>• 0,18</li> <li>• 0,32</li> <li>• 0,28</li> <li>• 0</li> <li>• 0,3</li> </ul>	gewichteter Durchschnitt 0,22
	Recyclinganteil	-	-	13,7 %
	KEA	-	-	2,96 MJ/MJ
	abiotische MI	-	-	9,612 kg/MJ
	virtuelles Wasser	-	-	136,512 kg/MJ
	KEA Antransport	-	-	0,075 MJ/MJ
	Süßwasser-Ökotoxizität	-	-	0,0007 kg 1,4-DCB-Äqu./MJ
	Meerwasser-Ökotoxizität	-	-	63,922 kg 1,4-DCB-Äqu./MJ

Erboden- Ökotoxizität	-	-	0,00043 kg 1,4- DCB-Äqu./MJ
Humantoxizität	-	-	0,02 kg 1,4-DCB- Äqu./MJ

Tabelle 22: Ausprägungen von EN AW 6060 bezüglich der Input-Attribute

Ressource	Kriterium	Zusammensetzung	Werte	Ausprägung
EN AW 6060	statische Reserven- reichweite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 99,05 % Al</li> <li>• 0,3 % Si</li> <li>• 0,3 % Fe</li> <li>• 0,35 % Mg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 157 a</li> <li>• 681 a</li> <li>• 119 a</li> <li>• 515 a</li> </ul>	gewichteter Durchschnitt
				159,71 a
	Importanteil	-	-	73 %
	Durchschnitt WGI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 99,05 % Al</li> <li>• 0,3 % Si</li> <li>• 0,3 % Fe</li> <li>• 0,35 % Mg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,1</li> <li>• 0</li> <li>• 0,2</li> <li>• -0,3</li> </ul>	gewichteter Durchschnitt
	0,099			
	Herfindal- Index	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 99,05 % Al</li> <li>• 0,3 % Si</li> <li>• 0,3 % Fe</li> <li>• 0,35 % Mg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,18</li> <li>• 0,27</li> <li>• 0,23</li> <li>• 0,6</li> </ul>	gewichteter Durchschnitt
	0,18			
	Recyclinganteil	-	-	60 %
	KEA	-	-	4,92 MJ/kg
	abiotische MI	-	-	18,98 kg/kg
	virtuelles Wasser	-	-	539,21 kg/kg
	KEA Antransport	-	-	172 MJ/kg
	Süßwasser- Ökotoxizität	-	-	0,00066 kg 1,4- DCB-Äqu./kg
	Meerwasser- Ökotoxizität	-	-	48,567 kg 1,4- DCB-Äqu./kg
	Erboden- Ökotoxizität	-	-	0,0008 kg 1,4- DCB-Äqu./kg
	Humantoxizität	-	-	0,02 kg 1,4-DCB- Äqu./kg

## Anhang B

Tabelle 23: Ausprägungen von AlSi12 bezüglich der Input-Attribute

Ressource	Kriterium	Zusammensetzung	Werte	Ausprägung
AlSi12	statische Reservenreichweite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 88 % Al</li> <li>• 12 % Si</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 157 a</li> <li>• 681 a</li> </ul>	gewichteter Durchschnitt 159,71 a
	Importanteil	-	-	73 %
	Durchschnitt WGI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 88 % Al</li> <li>• 12 % Si</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,1</li> <li>• 0</li> </ul>	gewichteter Durchschnitt 0,09
	Herfindal-Index	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 88 % Al</li> <li>• 12 % Si</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,18</li> <li>• 0,27</li> </ul>	gewichteter Durchschnitt 0,19
	Recyclinganteil	-	-	60 %
	KEA	-	-	4,92 MJ/kg
	abiotische MI	-	-	18,98 kg/kg
	virtuelles Wasser	-	-	539,21 kg/kg
	KEA Antransport	-	-	258 MJ/kg
	Süßwasser-Ökotoxizität	-	-	0,029 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
	Meerwasser-Ökotoxizität	-	-	400 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
	Erboden-Ökotoxizität	-	-	0,03 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
	Humantoxizität	-	-	7,66 kg 1,4-DCB-Äqu./kg

Tabelle 24: Ausprägungen von Argon bezüglich der Input-Attribute

Ressource	Kriterium	Zusammensetzung	Werte	Ausprägung
Argon	statische Reservenreichweite	-	-	681 a
	Importanteil	-	-	0 %
	Durchschnitt WGI	-	-	2,5
	Herfindal-Index	-	-	0
	Recyclinganteil	-	-	0 %
	KEA	-	-	5,05 MJ/kg

abiotische MI	-	-	82 kg/kg
virtuelles Wasser	-	-	744 kg/kg
KEA Antransport	-	-	51,6
Süßwasser-Ökotoxizität	-	-	0,00036 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
Meerwasser-Ökotoxizität	-	-	32,79 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
Erdboden-Ökotoxizität	-	-	0,00052 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
Humantoxizität	-	-	0,0009 kg 1,4-DCB-Äqu./kg

Tabelle 25: Ausprägungen der Betriebsstoffe auf Mineralölbasis bezüglich der Input-Attribute

Ressource	Kriterium	Zusammensetzung	Werte	Ausprägung
HLP46, CLP46, CLP220	statische Reservenreichweite	-	-	42 a
	Importanteil	-	-	97,7 %
	Durchschnitt WGI	-	-	-0,74
	Herfindal-Index	-	-	0,3
	Recyclinganteil	-	-	0 %
	KEA	-	-	47,8 MJ/kg
	abiotische MI	-	-	1,22 kg/kg
	virtuelles Wasser	-	-	4,28 kg/kg
	KEA Antransport	-	-	43 MJ/kg
	Süßwasser-Ökotoxizität	-	-	0,0511 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
	Meerwasser-Ökotoxizität	-	-	160 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
	Erdboden-Ökotoxizität	-	-	0,00233 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
	Humantoxizität	-	-	0,091 kg 1,4-DCB-Äqu./kg

Tabelle 26: Ausprägungen des Leitungswassers bezüglich der Input-Attribute

Ressource	Kriterium	Zusammensetzung	Werte	Ausprägung
Leitungswasser	statische Reservenreichweite	-	-	681 a
	Importanteil	-	-	0 %
	Durchschnitt WGI	-	-	2,5
	Herfindal-Index	-	-	0
	Recyclinganteil	-	-	0 %
	KEA	-	-	0,00356 MJ/kg
	abiotische MI	-	-	0,02 kg/kg
	virtuelles Wasser	-	-	1,14 kg/kg
	KEA Antransport	-	-	0 MJ/kg
	Süßwasser-Ökotoxizität	-	-	0,0000013 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
	Meerwasser-Ökotoxizität	-	-	0,047 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
	Erboden-Ökotoxizität	-	-	0,00000082 kg 1,4-DCB-Äqu./kg
	Humantoxizität	-	-	0,000011 kg 1,4-DCB-Äqu./kg

Die Ausprägungen von Output-Ressourcen bezüglich der relevanten Attribute sind in Tabelle 27, Tabelle 28, Tabelle 29, Tabelle 30 und Tabelle 31 zusammengefasst. Die Werte wurden Expertenschätzungen, den integrierten Datenbanken der GaBi Software, der ecoinvent-Datenbank sowie der Rigoletto-Datenbank des Umweltbundesamts entnommen.

Tabelle 27: Ausprägungen von EN AW 6060 bezüglich der Output-Attribute

Ressource	Kriterium	Ausprägung
EN AW 6060	recyclingfähiger Anteil	99 %
	KEA Abtransport	258 MJ/kg
	KEA Trennung / Entsorgung	38,4 MJ/kg
	akute orale Toxizität	0
	Inhalationstoxizität	0

Hautreizung	0
Wassergefährdungsklasse	0
biologische Abbaubarkeit	3

Tabelle 28: Ausprägungen von AlSi12 bezüglich der Output-Attribute

Ressource	Kriterium	Ausprägung
AlSi12	recyclingfähiger Anteil	99 %
	KEA Abtransport	258 MJ/kg
	KEA Trennung / Entsorgung	38,4 MJ/kg
	akute orale Toxizität	0
	Inhalationstoxizität	0
	Hautreizung	0
	Wassergefährdungsklasse	0
	biologische Abbaubarkeit	3

Tabelle 29: Ausprägungen von Argon bezüglich der Output-Attribute

Ressource	Kriterium	Ausprägung
Argon	recyclingfähiger Anteil	100 %
	KEA Abtransport	0 MJ/kg
	KEA Trennung / Entsorgung	0 MJ/kg
	akute orale Toxizität	0
	Inhalationstoxizität	2
	Hautreizung	0
	Wassergefährdungsklasse	0
	biologische Abbaubarkeit	1

Tabelle 30: Ausprägungen der Betriebsstoffe auf Mineralölbasis bezüglich der Output-Attribute

Ressource	Kriterium	Ausprägung
HLP46, CLP46, CLP220	recyclingfähiger Anteil	65 %
	KEA Abtransport	86 MJ/kg
	KEA Trennung / Entsorgung	0,433 MJ/kg
	akute orale Toxizität	2
	Inhalationstoxizität	0

## Anhang B

Hautreizung	0
Wassergefährdungsklasse	1
biologische Abbaubarkeit	4

Tabelle 31: Ausprägungen der Leitungswassers bezüglich der Output-Attribute

<b>Ressource</b>	<b>Kriterium</b>	<b>Ausprägung</b>
Leitungswasser	recyclingfähiger Anteil	100 %
	KEA Abtransport	0 MJ/kg
	KEA Trennung / Entsorgung	0,0061 MJ/kg
	akute orale Toxizität	0
	Inhalationstoxizität	0
	Hautreizung	0
	Wassergefährdungsklasse	0
	biologische Abbaubarkeit	0



# Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim

Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**  
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**  
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**  
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**  
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-77-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-78-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**  
120 Seiten - ISBN 3-931327-79-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**  
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**  
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**  
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**  
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**  
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**  
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**  
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**  
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungs montage und zum Dichtmittelauftrag**  
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**  
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**  
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**  
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**  
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**  
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**  
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**  
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**  
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**  
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**  
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**  
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**  
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**  
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**  
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**  
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**  
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**  
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation  
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung  
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion  
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle  
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien  
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung  
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation  
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele  
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug  
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen  
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien  
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik  
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln  
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien  
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge  
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial  
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen  
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder  
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder  
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik  
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette  
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten  
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen  
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen  
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik  
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle  
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen  
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen  
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement  
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche  
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder  
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement  
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen  
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?  
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau  
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung  
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlang im Mittelstand  
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation  
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten  
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt  
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik  
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau  
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben  
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwv Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen  
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!  
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«  
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen  
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen  
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren  
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung  
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen  
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung  
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette  
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen  
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher  
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

## Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, sind im Springer Verlag,  
Berlin, Heidelberg erschienen

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [info@utzverlag.de](mailto:info@utzverlag.de), [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile  
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung  
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme  
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern  
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik  
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern  
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Ralf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen  
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen  
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen  
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping  
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden  
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heitmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle  
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen  
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik  
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken  
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung  
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen  
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen  
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schiffenbacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken  
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprenzel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung  
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion  
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen  
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion  
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen  
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen  
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehner:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlweißprozesses von Magnesiumdruckguss  
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen  
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Höhn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0
- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben  
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilbereitstellung  
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudorfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke  
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe  
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen  
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung  
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen  
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen  
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Lahrs:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppler:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik  
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weissenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Roggoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen  
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubverbindungen auf Basis akustischer Emissionen  
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung  
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräzenter Montagesysteme  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitingler:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen  
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieverling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling  
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems  
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Jochim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierloh:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung  
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern  
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9

- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme  
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing  
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgssysteme  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3
- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlsschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen  
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung  
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern  
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eirener:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griech:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion  
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme  
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlickentrieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansoerg:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wünsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmehranalytische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben  
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage  
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Loucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains  
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbigen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie  
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkopplenden Handschuhen  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlinterns  
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets  
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie  
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4

- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern  
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels  
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen  
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen  
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe  
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung  
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte  
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilezuführung  
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen  
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung  
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage  
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schlip:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz  
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens  
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme  
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme  
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest  
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze  
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung  
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik  
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten  
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung  
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen  
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen  
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots  
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz  
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Radi:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators  
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Rühstorfer:** Rührreibschweißen von Rohren  
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen  
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage  
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen  
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorförmlingen  
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)  
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen  
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung  
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden  
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen  
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6
- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren  
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung  
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2

