

**Methode zur integrierten  
ökologischen und ökonomischen Bewertung  
von Produktionsprozessen und -technologien**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**

**(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Axel Schultz, M.S.

geb. am 29.11.1968 in Iserlohn

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:           Herr Prof. Dr.-Ing. habil. H. Kühnle  
                          Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. E. Ambos  
                          Herr Dr.-Ing. W. Geisler

Promotionskolloquium am 06.09.2002

## **Abstract**

Die steigende Anzahl der Unternehmen, die sich nach der EG-Öko-Audit-Verordnung zertifizieren lassen, belegt die wachsende Bedeutung, die Umweltschutz in den Unternehmen erfährt. Allerdings wird der langfristige Erfolg von Umweltmanagementsystemen davon abhängen, inwieweit es gelingt, ökologische Belange fest neben betriebswirtschaftlichen Aspekten in Entscheidungsprozessen zu verankern. Aufgrund von Komplexität und Umfang der zu berücksichtigenden Daten und Informationen ist hierzu eine Unterstützung durch geeignete Methoden zur Aufbereitung und Verdichtung der Entscheidungsgrundlage erforderlich.

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung lassen sich die Kosten und Umweltwirkungen von Produktionsprozessen und -technologien verursachungsgerecht ermitteln und bewerten. Haupteinsatzgebiete sind die Technologie-, Investitionsbewertung und Prozeßbewertung im Rahmen der taktischen Produktionsplanung.

Faßt man eine ökologische bzw. ökonomische Bewertung als unterschiedliche Sichtweisen des untersuchten Prozesses auf, lassen sich sowohl Umweltwirkungen, als auch Kosten auf die In- und Outputs des Prozesses zurückführen. Eine Integration der beiden Bewertungen ist dann unter Verwendung einer gemeinsamen Datenbasis möglich, die mit Hilfe eines entsprechenden Prozeßmodells ermittelt werden kann.

Zur systematischen Umsetzung des Konzepts wird ein aus Grund- und Auswertungsrechnung bestehendes Integriertes Rechnungswesen vorgestellt. Die Grundrechnung umfaßt die Komponenten Flußarten-, Umweltwirkungsarten- und Kostenartenrechnung und dient zunächst der Ermittlung der Inputs und Outputs des untersuchten Prozesses, aus denen dann die verursachten Umweltwirkungen und Kosten berechnet werden. Anschließend werden diese mit Hilfe einer Auswertungsrechnung zu den Entscheidungsgrößen "Umweltwirkungsindex" und "Produktionsprozeßkosten" verdichtet. Hiermit werden zwei aussagekräftige und eindeutig zu optimierende Größen definiert, die ein hohes Maß an Entscheidungsunterstützung ermöglichen und speziell auf die Belange einer Prozeßbewertung zugeschnitten sind. Ferner wird ein "allgemeiner Prozeßsatz" vorgestellt, der als universelle Ergebnisgröße zur Charakterisierung und Bewertung einer Produktionstechnologie eingesetzt werden kann.

Zum Abschluß der Arbeit werden die Ergebnisse einer Technologiebewertung des Magnesiumspritzgießens im Vergleich zum etablierten Druckgießen vorgestellt. Hierzu werden die einzelnen Elemente der entwickelten Methode und die Vorgehensweise zur Ermittlung eines Prozeßsatzes exemplarisch angewandt und Entwicklungspotentiale der neuen Produktionstechnologie mit Hilfe von Parametervariationen im Sinne von "What-If"-Untersuchungen analysiert und bewertet.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Ökologische und ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Aufgaben einer Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2 Einordnung der Aufgabenstellung</b> .....	<b>6</b>
2.2.1 Bezug zu Aufgaben des Produktionsmanagements .....	6
2.2.2 Bezug zu Aufgaben des Umweltmanagements .....	7
2.2.3 Bezug zu Aufgaben des Kostenmanagements .....	9
<b>2.3 Eingrenzung des Anwendungsgebiets</b> .....	<b>10</b>
<b>3 Stand der Technik</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1 Methoden zur ökologischen Bewertung</b> .....	<b>13</b>
3.1.1 Methoden zur Ermittlung und Aufbereitung einer Datenbasis für eine ökologische Bewertung .....	14
3.1.2 Methoden zur ökologischen Bewertung der Datenbasis .....	16
<b>3.2 Methoden zur ökonomischen Bewertung</b> .....	<b>19</b>
3.2.1 Methoden zur Ermittlung der Kosten von Produktionsprozessen .....	19
3.2.2 Methoden zur Bewertung der Kosten von Produktionsprozessen .....	24
3.2.3 Methoden zur ökonomischen Bewertung umweltrelevanter Aspekte .....	27
<b>3.3 Methoden zur ökologischen und ökonomischen Bewertung</b> .....	<b>29</b>
<b>3.4 Schlußfolgerungen für eine Weiterentwicklung bestehender Methoden</b> .....	<b>31</b>
<b>4 Zielsetzung</b> .....	<b>35</b>
<b>5 Konzept der Methode der Integrierten Bewertung</b> .....	<b>36</b>
<b>5.1 Integration von ökologischer und ökonomischer Bewertung</b> .....	<b>36</b>
<b>5.2 Ökologische und ökonomische Bewertungsgrößen</b> .....	<b>38</b>
<b>5.3 Prozeßbeschreibende Datenbasis</b> .....	<b>40</b>

<b>5.4</b>	<b>Integriertes Prozeßmodell zur Ermittlung der prozeßbeschreibenden Datenbasis .....</b>	<b>42</b>
<b>5.5</b>	<b>Integriertes Rechnungswesen als unterstützender Systemansatz .....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Grundrechnung der Methode der Integrierten Bewertung.....</b>	<b>48</b>
<b>6.1</b>	<b>Aufgabe der Grundrechnung .....</b>	<b>48</b>
<b>6.2</b>	<b>Flußartenrechnung der Methode der Integrierten Bewertung .....</b>	<b>50</b>
6.2.1	Integrierter Kontenplan zur Klassifizierung der Flüsse.....	50
6.2.2	Erfassungsumfang und -ebenen der Flüsse .....	52
6.2.3	Berücksichtigung der Reagibilität der Flüsse.....	54
6.2.4	Bezugsgrößen bei der Datenerfassung .....	56
6.2.5	Vorgehensweise und allgemeine Verrechnungsprinzipien bei der Datenerfassung.....	59
6.2.6	Verrechnung im Rahmen einer Prozeß- bzw. Produktkalkulation .....	62
6.2.7	Verrechnung im Rahmen einer Investitionsbewertung .....	62
6.2.8	Verrechnung im Rahmen einer Technologiebewertung .....	64
<b>6.3</b>	<b>Umweltwirkungsartenrechnung der Methode der Integrierten Bewertung.....</b>	<b>66</b>
<b>6.4</b>	<b>Kostenartenrechnung der Methode der Integrierten Bewertung .....</b>	<b>70</b>
<b>6.5</b>	<b>Mathematische Modellierung der Grundrechnung .....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>Auswertungsrechnung der Methode der Integrierten Bewertung.....</b>	<b>77</b>
<b>7.1</b>	<b>Aufgabe der Auswertungsrechnung .....</b>	<b>77</b>
<b>7.2</b>	<b>Ökologische Auswertungsrechnung der Methode der Integrierten Bewertung .....</b>	<b>78</b>
7.2.1	Definition einer ökologischen Entscheidungsgröße .....	78
7.2.2	Berechnung der ökologischen Entscheidungsgröße .....	79
<b>7.3</b>	<b>Ökonomische Auswertungsrechnung der Methode der Integrierten Bewertung.....</b>	<b>83</b>
7.3.1	Definition ökonomischer Entscheidungsgrößen.....	83
7.3.2	Berechnung der ökonomischen Entscheidungsgrößen .....	85
<b>7.4</b>	<b>Mathematische Modellierung der Auswertungsrechnung.....</b>	<b>86</b>
<b>8</b>	<b>Anwendung der Methode der Integrierten Bewertung.....</b>	<b>89</b>
<b>8.1</b>	<b>Ausprägungsformen der Methode der Integrierten Bewertung .....</b>	<b>89</b>
8.1.1	Prozeß- bzw. Produktkalkulation .....	89
8.1.2	Investitionsbewertung.....	90
8.1.3	Technologiebewertung .....	92
<b>8.2</b>	<b>Vorgehensweise zur Anwendung der Methode.....</b>	<b>95</b>
8.2.1	Festlegung des Bewertungsrahmens.....	96
8.2.2	Prozeßmodellierung und Grundrechnung.....	97
8.2.3	Auswertungsrechnung und Ableiten einer Bewertungsaussage.....	98
<b>8.3</b>	<b>Einordnung und Abgrenzung der Methode der Integrierten Bewertung .....</b>	<b>100</b>

<b>9</b>	<b>Exemplarische Anwendung der Methode der Integrierten Bewertung zur Technologiebewertung des Magnesiumspritzgießens.....</b>	<b>104</b>
<b>9.1</b>	<b>Hintergrund .....</b>	<b>104</b>
<b>9.2</b>	<b>Festlegung des Bewertungsrahmens .....</b>	<b>106</b>
<b>9.3</b>	<b>Prozeßmodellierung und Grundrechnung .....</b>	<b>109</b>
9.3.1	Prozeßmodellierung Magnesiumspritzgießen (Thixomolding) .....	109
9.3.2	Prozeßmodellierung Magnesiumdruckgießen .....	111
9.3.3	Ergebnisse der Grundrechnung .....	113
9.3.3.1	Ergebnisse der Flußartenrechnung .....	113
9.3.3.2	Ergebnisse der Umweltwirkungsarten- und Kostenartenrechnung .....	116
<b>9.4</b>	<b>Auswertungsrechnung und Ableiten einer Bewertungsaussage.....</b>	<b>117</b>
9.4.1	Ergebnisse der Auswertungsrechnung.....	117
9.4.2	Ableiten einer Bewertungsaussage.....	119
9.4.2.1	Bewertungsaussage auf Basis der ermittelten Ergebnisgrößen .....	119
9.4.2.2	Bewertung der Entwicklungspotentiale des Magnesiumspritzgießens.....	122
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>129</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>132</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Nutzung gemeinsamer Optimierungspotentiale als Ziel [Schultz 1998].....	2
Abb. 2: Erfordernis einer Integration von ökologischer und ökonomischer Betrachtung und einer Unterstützung durch Methoden zur Entscheidungsvorbereitung [in Anl. an Schlatter 1998] ..	3
Abb. 3: Allgemeines Prinzip einer Bewertung [Giegrich 1995].....	5
Abb. 4: Unterstützung von Aufgaben des Umweltmanagements im Rahmen des Öko-Controllings [Spengler 1998; BUM/UBA 1995; Schaltegger 1992; Molthan 1992] .....	8
Abb. 5: Übersicht eingeführter Methoden zur Ermittlung und Aufbereitung einer Datenbasis für eine ökologische Bewertung (Auswahl) .....	14
Abb. 6: Übersicht eingeführter Methoden zur ökologischen Bewertung (Auswahl).....	17
Abb. 7: Übersicht eingeführter Methoden zur Ermittlung der Kosten von Produktionsprozessen (Auswahl).....	21
Abb. 8: Übersicht eingeführter Methoden zur Bewertung der Kosten von Produktionsprozessen (Auswahl).....	25
Abb. 9: Übersicht eingeführter Methoden zur ökonomischen Bewertung umweltrelevanter Aspekte (Auswahl).....	27
Abb. 10: Übersicht eingeführter Methoden zur ökologischen und ökonomischen Bewertung (Auswahl).....	29
Abb. 11: Systemansatz des Integrierten Rechnungswesens: Integration von ökologischer und ökonomischer Bewertung über eine gemeinsame Datenbasis .....	37
Abb. 12: Größen zur ökologischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien.....	39
Abb. 13: Integriertes Prozeßmodell zur Ermittlung einer gemeinsamen Datenbasis [Schultz 1997] ...	43
Abb. 14: Auswertung der mit Hilfe des Integrierten Prozeßmodells ermittelten Datenbasis .....	44
Abb. 15: Überführung bestehender Ansätze aus Ökobilanzierung, Kosten- und Leistungsrechnung in Komponenten des Integrierten Rechnungswesens.....	46
Abb. 16: Schematische Darstellung der Ergebnisse der Grundrechnung .....	49
Abb. 17: Ambivalenz der Zurechenbarkeit von Flüssen in Abhängigkeit von der Erfassungsebene ...	54
Abb. 18: Differenzierung der Flüsse nach ihrer Reagibilität .....	55
Abb. 19: Bewertungszielorientierte Wahl der Bezugsgrößen in der Grundrechnung.....	58
Abb. 20: Vorgehensweise zur bewertungszielorientierten Datenerfassung.....	60
Abb. 21: Verrechnung zeitabhängiger Größen zwischen den Reagibilitätszeitstufen .....	61
Abb. 22: Verrechnung übergeordneter Gemeingrößen bei ausbringungsabhängigen Flüssen .....	61
Abb. 23: Verrechnung im Rahmen einer Prozeß- bzw. Produktkalkulation.....	62
Abb. 24: Ermittlung eines Periodenergebnisses im Rahmen einer Investitionsbewertung.....	63
Abb. 25: Verrechnung im Rahmen einer Investitionsbewertung.....	64
Abb. 26: Verrechnung im Rahmen einer Technologiebewertung zur Ermittlung eines allgemeinen Prozeßsatzes.....	65
Abb. 27: Aufgabe der Umweltwirkungsartenrechnung im Integrierten Rechnungswesen.....	67
Abb. 28: Bilanzierungsrahmen der unterschiedlichen Bilanzarten [Schultz 1997] .....	67

Abb. 29: Dilemma der Datenverfügbarkeit und -relevanz [Schultz 1997] .....	68
Abb. 30: Aufgabe der Kostenartenrechnung im Integrierten Rechnungswesen .....	71
Abb. 31: Ermittlung der Bewertungsgrößenmatrix.....	74
Abb. 32: Ergebnisvektor der Grundrechnung .....	75
Abb. 33: Stellung der Auswertungsrechnung im Integrierten Rechnungswesen.....	77
Abb. 34: Normalisierung der Wirkungsindikatorergebnisse .....	80
Abb. 35: Ansätze zur Gewichtung der Wirkungskategorien nach Stahl [Stahl 1999].....	82
Abb. 36: Berechnung der ökonomischen Entscheidungsgrößen .....	85
Abb. 37: Einbindung in bestehende Systeme der Kostenrechnung .....	86
Abb. 38: Kompatibilität zur konventionellen Kostenrechnung .....	86
Abb. 39: Mathematische Modellierung der Auswertungsrechnung .....	87
Abb. 40: Aufbau des Prozeßsatzes.....	93
Abb. 41: Anwendungsmöglichkeiten des Prozeßsatzes.....	95
Abb. 42: Vorgehensweise zur Anwendung der Methode der Integrierten Bewertung .....	96
Abb. 43: Ableitung einer ganzheitlichen Bewertungsaussage .....	99
Abb. 44: Exemplarische Aufbereitung der Ergebnisse zur Ableitung einer Bewertungsaussage.....	100
Abb. 45: Charakteristische Elemente der Methode der Integrierten Bewertung .....	102
Abb. 46: Entwicklung und Verbreitung der Technologie des Magnesiumspritzgießens.....	105
Abb. 47: Referenzbauteil zur Ermittlung der Datengrundlage (Schaltgehäuse).....	106
Abb. 48: Verfahrensprinzip Magnesiumspritzgießen (Thixomolding).....	109
Abb. 49: Integriertes Prozeßmodell für das Magnesiumspritzgießen .....	110
Abb. 50: Verfahrensprinzip Druckgießen [Hydro 1999] .....	111
Abb. 51: Integriertes Prozeßmodell für das Magnesiumdruckgießen.....	112
Abb. 52: Vergleich der Ergebnisgrößen UWI und PPK für ein repräsentatives Bauteil .....	119
Abb. 53: Relative Umweltwirkungen bei der Herstellung von Magnesiumspritzgießbauteilen in Abhängigkeit von den Parametern Bauteilmasse und Zykluszeit (Druckgießen = 100%)...	120
Abb. 54: Relative Bauteilkosten von Magnesiumspritzgießbauteilen in Abhängigkeit von den Parametern Bauteilmasse und Zykluszeit (Druckgießen = 100%).....	121
Abb. 55: Einfluß der Rohmaterialkosten und des Schußgewichts auf die Bauteilkosten .....	123
Abb. 56: Einfluß der Kosten für Magnesiumgranulat und der Ausschußquote auf die Bauteilkosten	124
Abb. 57: Einfluß der Zykluszeit und der Anlagekosten auf die Bauteilkosten.....	125
Abb. 58: Potentiale des Magnesiumspritzgießens bei einer konsequenten Weiterentwicklung der Technologie - Relative Umweltwirkungen (Druckgießen = 100%) .....	127
Abb. 59: Potentiale des Magnesiumspritzgießens bei einer konsequenten Weiterentwicklung der Technologie - Relative Bauteilkosten (Druckgießen = 100%) .....	127
Abb. 60: Potentiale des Magnesiumspritzgießens bei einer konsequenten Weiterentwicklung der Technologie - Ergebnisgrößen UWI und PPK für ein repräsentatives Bauteil.....	128

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Charakterisierung der Bewertungsaufgaben im Rahmen des Produktionsmanagements .....	11
Tab. 2:	Charakterisierung eingeführter Methoden zur Ermittlung einer Datenbasis .....	16
Tab. 3:	Charakterisierung eingeführter Methoden zur ökologischen Bewertung .....	18
Tab. 4:	Entwicklungsformen der Kostenartenrechnung (Grundrechnung) [In Anl. an Heinen 1991] .....	20
Tab. 5:	Entwicklungsformen der Kostenträgerrechnung (Auswertungsrechnung) [In Anl. an Heinen 1991] .....	20
Tab. 6:	Charakterisierung eingeführter Methoden zur Ermittlung der Kosten von Produktionsprozessen .....	24
Tab. 7:	Charakterisierung eingeführter Methoden zur monetären Bewertung umweltrelevanter Aspekte .....	29
Tab. 8:	Charakterisierung eingeführter Methoden zur ökologischen und ökonomischen Bewertung .....	31
Tab. 9:	Ansatzpunkte und Schwerpunkte für die Entwicklung einer Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien	34
Tab. 10:	Charakterisierung eines Flusses .....	45
Tab. 11:	Allgemeiner Integrierter Kontenplan (Input) .....	51
Tab. 12:	Allgemeiner Integrierter Kontenplan (Output) .....	52
Tab. 13:	Charakterisierungsfaktoren für unterschiedliche Flüsse .....	70
Tab. 14:	Verrechnungspreise .....	71
Tab. 15:	Einordnung einer Prozeß-Fixkosten-Deckungsrechnung .....	73
Tab. 16:	Gewichtungsfaktoren für die verschiedenen Gewichtungsansätze [Stahl 1999] .....	83
Tab. 17:	Abgrenzung der Methode der Integrierten Bewertung .....	101
Tab. 18:	Anknüpfungspunkte der Methode der Integrierten Bewertung zu bestehenden Konzepten	103
Tab. 19:	Ökologische und ökonomische Kriterien bei der Bewertung des Magnesiumspritzgießens	108
Tab. 20:	Wichtige der Grundrechnung zugrunde gelegte maschinen- und prozeßbezogene Parameter .....	115
Tab. 21:	Aggregiertes Ergebnis der Flußartenrechnung für ein repräsentatives Produkt .....	115
Tab. 22:	Bewertungsgrößenvektor (BGV) .....	116
Tab. 23:	Prozeßsätze der Technologien Magnesiumspritzgießen und Druckgießen im Vergleich .....	117
Tab. 24:	Potentiale des Magnesiumspritzgießens bei einer konsequenten Weiterentwicklung der Technologie des Magnesiumspritzgießens - Prozeßsätze .....	126

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AE	einzelne Ausbringungseinheit
AG	Gruppe von Ausbringungseinheiten
Anl.	Anlehnung
AP	Versauerungspotential
BAM	Bewertungs- und Aggregationsmatrix
BGM	Bewertungsgrößenmatrix
BGM <sup>T</sup>	Bewertungsgrößenmatrix, transponiert
BGV	Bewertungsgrößenvektor
BGV <sup>T</sup>	Bewertungsgrößenvektor, transponiert
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt
bzw.	beziehungsweise
CF	Charakterisierungsfaktor
CF <sub>f,u</sub>	Charakterisierungsfaktor des Flusses f für die Umweltwirkungsart u
CML	Centrum voor Milieukunde in Leiden, Niederlande
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
Diss.	Dissertation
€	Euro
E	Einheitsvektor
EP	Eutrophierungspotential
EEPF	ökotoxikologisches Effektpotential
et al.	et altera
EUCAR	European Council for Automotive Research
EV	Ergebnisvektor
EV <sup>T</sup>	Ergebnisvektor , transponiert
f	Flußindex
ff	folgende
FGV	Flußgrößenvektor
FG <sub>f</sub>	Größe des Flusses f
FZ	Fertigungszeit
GF <sub>u</sub>	Gewichtungsfaktor für die Umweltwirkungsart u

ggf.	gegebenenfalls
GWP <sub>100</sub>	Treibhauspotential (Betrachtungszeitraum: 100 Jahre)
h	Stunde
i.d.R.	in der Regel
i	Inputindex
IOM	Input-Output-Matrix
ISO	International Standardisation Organisation
j	Anzahl der Inputs
k	Kostenartenindex
kalk.	kalkulatorisch
Kap.	Kapitel
KEA	Kumulierter Energieaufwand
kg	Kilogramm
KG	Ansatz der kritischen Größe
KW <sub>k</sub>	Kosten(wirkung) für die Kostenart k
KW <sub>f,v+k</sub>	Kosten(wirkung) des Flusses f für die Kostenart k
KW <sub>v+k</sub>	Gesamtkosten(wirkung) für die Kostenart k
kWh	Kilowattstunde
l	Anzahl der Kostenarten
LG	Leitgröße
m	Anzahl der Flüsse
MADICA	MADICA - Sichere Produktionsprozesse für die Magnesiumver- und -bearbeitung (BMBF-Projekt)
MATALEND	MATALEND - Werkstoff- und Verfahrenstechnik für das Metallspritzgießen von neuen kriechbeständigen Magnesiumlegierungen (BMBF-Projekt)
MAK	maximale Arbeitsplatzkonzentration
MTM	Methods Time Measurement
n	Anzahl der Bewertungsgrößen
NF <sub>Referenz,u</sub>	Normalisierungsfaktor für die Umweltwirkungsart u (bezogen auf die Referenzbasis)
NGF <sub>u</sub>	Normalisierungs- und Gewichtungsfaktor für die Umweltwirkungsart u
Norm	Normalisierung
NWA	nutzwertanalytischer Ansatz
o	Outputindex
ODP	Ozonerstörungspotential
p	Anzahl der Outputs
PJ	Periode (Jahr)

PM	Periode (Monat)
PN	Periode (Nutzungszeit)
PPK	Produktionsprozeßkosten
PPK <sub>Bezug</sub>	Produktionsprozeßkosten (der jeweiligen Bezugsgröße)
Präf	Präferenzen des Bewertenden oder mit Hilfe sozialwissenschaftlicher Methoden (z.B. Befragungen) ermittelt
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
S.	Seite
SFB	Sonderforschungsbereich
SN	Schaden-Nutzen-Ansatz
ökotox.	ökotoxikologisch
TU	Technische Universität
u	Umweltwirkungsartenindex
u.	und
u.a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
UW <sub>f,u</sub>	Umweltwirkung des Flusses f für die Umweltwirkungsart u
UW <sub>Norm, u</sub>	normalisierte Umweltwirkung für die Umweltwirkungsart u
UW <sub>Referenz, u</sub>	Umweltwirkung der Referenzbasis für die Umweltwirkungsart u
UW <sub>u</sub>	Gesamtumweltwirkung für die Umweltwirkungsart u
UWI	Umweltwirkungsindex
v	Anzahl der Umweltwirkungsarten
v.a.	vor allem
v-a	verbal-argumentativer Ansatz
vgl.	vergleiche
VP	Verrechnungspreis
VP <sub>f,v+k</sub>	Verrechnungspreise des Flusses f für die Kostenart k
w	Wirkungsfaktorindex
WFM	Wirkungsfaktorenmatrix
z.B.	zum Beispiel
ZE	Zeiteinheit (Stunde)
zugl.	zugleich

# 1 Einleitung

In der Vergangenheit waren ökologische Problemstellungen für viele Unternehmen nur insoweit relevant, wie entsprechende Verordnungen und Gesetze existierten. Gesellschaftlicher Wertewandel, das Leitbild der "Nachhaltigen Entwicklung" [Kanning 2001; Müller-Christ 2001; Forum 1998; Lehner 1998], verschärfte umweltrechtliche Rahmenbedingungen und gestiegene Aufwände zur Erfüllung von Umweltschutzaufgaben haben jedoch dazu geführt, daß das Thema "Umwelt" einen höheren Stellenwert im Unternehmen bekommen hat [Ahrend 1999; Westkämper 1999; Hermann 1996; Zahn 1996; Kühnle 1995a]. Begleitet und unterstützt wird dieser Wertewandel bereits seit Beginn der 90er-Jahre durch Aktivitäten des Gesetzgebers und internationaler Gremien, mit denen ein Übergang von einem durch Verbote und Grenzwerte gesteuerten hin zu einem aktiveren Umweltverhalten mit mehr Eigenverantwortung angestrebt wird [MUV 2001; Birkhofer 2000].

In den Unternehmen setzt sich daher zunehmend die Erkenntnis durch, daß eine umweltorientierte Unternehmensführung nicht eine vorübergehende Modeerscheinung ist, sondern vielmehr langfristig für Überleben und Erfolg am Markt notwendig ist und auch wirtschaftliche Vorteile bieten kann. Betrieblicher Umweltschutz wird daher zunehmend auch als "Langzeitökonomie" betrachtet [Trittin 1999; Gege 1997].

Die feste Verankerung des Themas läßt sich unter anderem an der kontinuierlich steigenden Anzahl derjenigen Unternehmen ablesen, die sich nach den in der EG-Öko-Audit-Verordnung [EWG 1993] bzw. in der Norm DIN EN ISO 14.000ff [Müller 2001; ISO 14001, 1996] festgeschriebenen Standards zum Umweltmanagement zertifizieren lassen [Maag 2001; Bullinger 2000a; Bullinger 1999a]. Mit ihrer Teilnahme am sogenannten "Öko-Audit" verpflichten sich die registrierten Unternehmen u.a., eine betriebliche Umweltpolitik festzulegen, alle einschlägigen Umweltvorschriften einzuhalten und den betrieblichen Umweltschutz über das gesetzlich erforderte Maß hinaus zu betreiben [MUV 2001]. Die Selbstverpflichtung beinhaltet auch eine kontinuierliche Verringerung der von der gewerblichen Tätigkeit verursachten Umweltauswirkungen in einem Umfang, wie er sich mit der wirtschaftlich vertretbaren Anwendung der besten verfügbaren Technik erreichen läßt [Müller-Christ 2001; Bouscaren 2000; EWG 1993].

Der zukünftige Erfolg von Umweltmanagementsystemen wird allerdings stark davon abhängen, inwieweit es gelingt, den Faktor "Umwelt" fest in betriebliche Entscheidungsprozesse zu integrieren, um zu vermeiden, daß Umweltschutz nur in einem Umfang praktiziert wird, wie er für eine regelmäßige Berichterstattung gegenüber Behörden und Kunden notwendig ist [Bullinger 2000b; Bullinger 1999b]. In diesem Zusammenhang hat unternehmerischer Umweltschutz in der betrieblichen Praxis langfristig vor allem dann eine Chance, wenn er auch ökonomisch tragbar ist und die damit verbundenen Maßnahmen wirtschaftlich sind. Denn ein Ausklammern betriebswirtschaftlicher Aspekte bei Managemententscheidungen wäre sowohl illusorisch, als auch nicht zielführend, zumal die Gefahr besteht, daß

unrentable "Öko-Konzepte" in wirtschaftlich schlechten Zeiten nicht weitergeführt werden [Eversheim 1999; Schaltegger 1995].

Vor diesem Hintergrund wird zunehmend die Strategie eines "integrierten Umweltschutzes" verfolgt, der alle Unternehmensaktivitäten umfaßt und bereits an der Quelle der Produktion und der Produktionsplanung ansetzt, um Umweltbelastungen gar nicht erst entstehen zu lassen [BUM/UBA 2001; Spengler 1998]. Im Gegensatz zu additiven, nachsorgenden Maßnahmen, die in der Regel mit einer Verlagerung von Umweltproblemen und faktisch immer mit zusätzlichen Kosten verbunden sind, bietet ein produkt- und produktionsintegrierter Umweltschutz die Möglichkeit, Umweltbelastungen und Kosten gleichermaßen zu reduzieren (Abb. 1) [MUV 2001; Barankay 2000; Eversheim 1999; Gege 1997; Saur 1996a]. Schätzungen gehen davon aus, daß sich 2-5% der Gesamtkosten eines Unternehmens durch gezieltes Umweltmanagement einsparen lassen [Trittin 1999]. Mittlerweile werden daher neben rechtlichen Rahmenbedingungen die Aussicht auf Kosteneinsparungen als ein wichtiger treibender Faktor für Umweltschutzmaßnahmen gesehen [Neukirchen 2001; Birkhofer 2000].

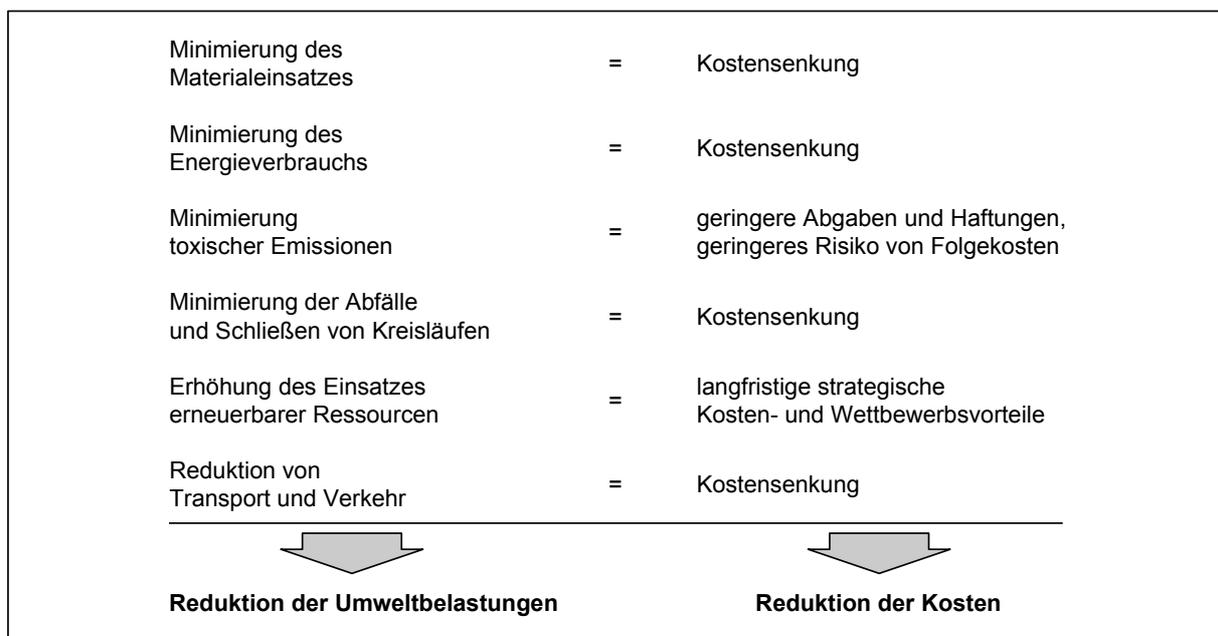


Abb. 1: Nutzung gemeinsamer Optimierungspotentiale als Ziel [Schultz 1998]

Zur Sicherstellung einer langfristigen Verankerung des Umweltschutzes im Unternehmen und zur Erschließung der in Abb. 1 beschriebenen Kostensenkungspotentiale ergibt sich die Notwendigkeit, die Auswirkungen der betrieblichen Tätigkeit auf die Umwelt und das betriebswirtschaftliche Ergebnis gemeinsam und im Kontext zu betrachten. Im Fokus steht dabei die betriebliche Produktion, da sie zum einen einen wesentlichen Einfluß auf die Umwelleistung eines Unternehmens hat und in ihren Prozessen ein Großteil der direkt beeinflussbaren Stoff- und Energieverbräuche, Emissionen und Abfälle anfallen bzw. entstehen [Neukirchen 2001; Birkhofer 2000]. Zugleich liegen dort auch die größ-

ten Potentiale, um durch Einsparung und Kreislaufführung von Energie, Prozeßmedien und Material aktiv zum Umweltschutz und zur Kostenreduktion beizutragen [Warnecke 1998].

Eine erfolgreiche Umsetzung der Strategie eines vorsorgenden, integrierten Umweltschutzes erfordert daher, zukünftig nicht nur während des Betriebs, sondern bereits bei der Planung und Realisierung von Produktionsprozessen verstärkt ökonomische und ökologische Aspekte gleichermaßen zu berücksichtigen [Kühnle 1995b; Ahrend 1995]. Hierzu sind den Entscheidungsträgern im Unternehmen zielgerichtet aufbereitete Informationen zur Verfügung zu stellen, um sie in die Lage zu versetzen, die zu erwartenden Konsequenzen frühzeitig erkennen und beurteilen zu können (Abb. 2) [Schlatter 1998]. In diesem Zusammenhang sind effiziente betriebliche Umwelt- und Kostenmanagementsysteme von großer Bedeutung, um die erforderliche Transparenz zu schaffen sowohl hinsichtlich der mit dem Produktionsprozeß verbundenen Kosten als auch bezüglich Ressourceneinsatz, Emissionen und der verursachten Auswirkungen auf die Umwelt [Barankay 2000].

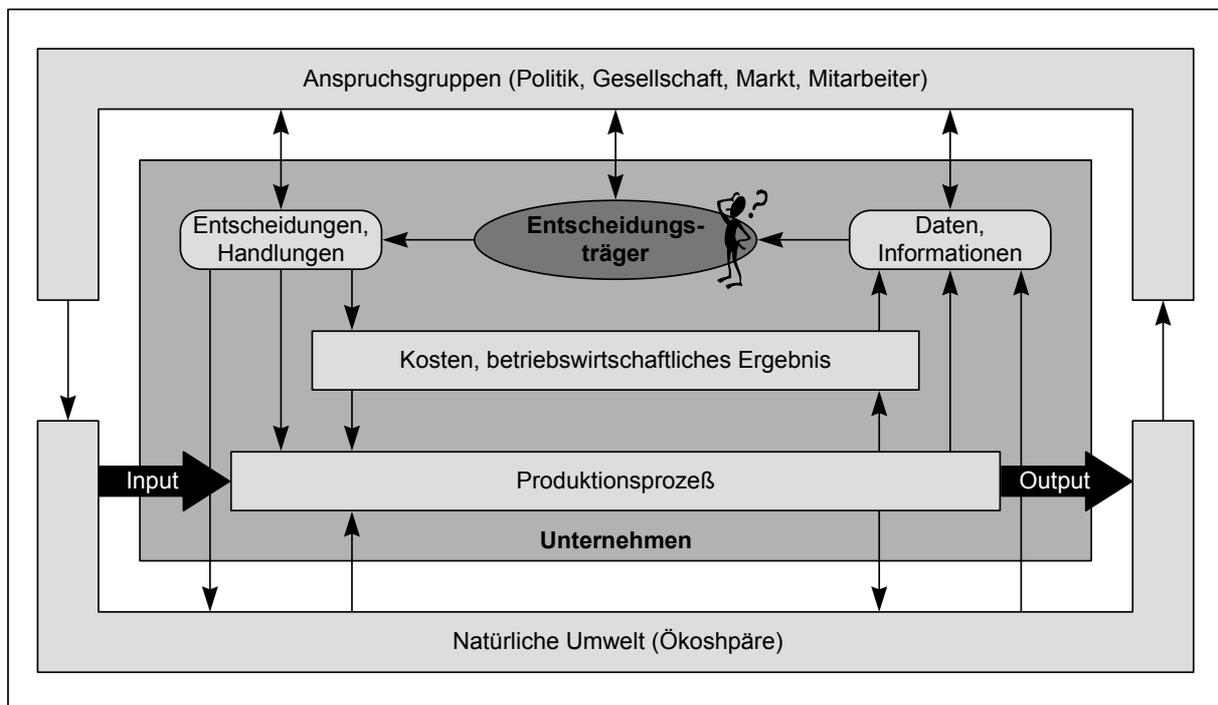


Abb. 2: Erfordernis einer Integration von ökologischer und ökonomischer Betrachtung und einer Unterstützung durch Methoden zur Entscheidungsvorbereitung [in Anl. an Schlatter 1998]

Die alleinige Kenntnis dieser Daten und Informationen reicht jedoch als Vorbereitung einer ganzheitlichen Entscheidungsfindung nicht aus. Vielmehr besteht aufgrund der Datenfülle und der Komplexität der Problematik die Notwendigkeit einer Verdichtung und Bewertung dieser Datenbasis. Im Hinblick auf die angestrebte Gesamtaussage sind dabei eine Verknüpfung von ökologischer und ökonomischer Bewertung sowie eine geeignete methodische Unterstützung wünschenswert.

Gegenwärtig besteht allerdings ein Defizit an praktikablen Methoden zur Erfassung, Verarbeitung und Bewertung der benötigten Daten und Informationen, so daß Entscheidungen über Investitionen, Produktionstechnologien und die Gestaltung von Prozessen bislang in erster Linie unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten getroffen werden und Umweltbelange allenfalls untergeordnet, separat und unsystematisch einbezogen werden [Neukirchen 2001; Schweres 1999; UBA 1999; Buchgeister 1998; Kühnle 1995a].

Mit dieser Arbeit soll daher eine Methode vorgestellt werden, die eine umfassende integrierte ökologische und ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien ermöglicht und zur Unterstützung ganzheitlicher Entscheidungsprozesse eingesetzt werden kann. Zu diesem Zweck werden nachfolgend zunächst die Aufgaben einer derartigen Bewertungsmethode genauer spezifiziert und die Problemstellung in die übergeordneten Aufgabenbereiche von Produktions-, Kosten- und Umweltmanagement eingeordnet. Daran schließt sich in Kap. 3 eine Analyse bereits existierender Methoden hinsichtlich ihrer Eignung zur Erfüllung dieser Anforderungen an, bevor auf Basis der Ergebnisse in Kap. 4 die konkrete Zielstellung der Arbeit formuliert wird.

## 2 Ökologische und ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien

### 2.1 Aufgaben einer Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien

Die zentrale Aufgabe einer Bewertungsmethode besteht in der transparenten Aufbereitung und Verdichtung von Informationen zur Vorbereitung einer Entscheidung (s. Abb. 2). Eine Bewertung ist insbesondere immer dann erforderlich, wenn mehrere Alternativen zur Auswahl stehen. Mit der Bildung von Prioritäten, d.h. einer vergleichenden, ordnenden oder quantifizierenden Einstufung der Alternativen, wird die Grundlage für eine fundierte Entscheidung erarbeitet [Grahl 1995].

Eine Bewertung ist definiert als eine zielbezogene Beurteilung eines Bewertungsobjekts auf der Grundlage eines Systems von Beurteilungskriterien, bei der durch die Verknüpfung von Daten und Informationen mit Werthaltungen, Kriterien und Präferenzen des Bewertenden eine Bewertungsaussage bzw. -urteil gewonnen wird [Giegrich 1995; Heinrich 1994]. Ein wesentliches Element ist die dabei zum Einsatz kommende Bewertungslogik, d.h. Regeln bzw. eine Abfolge von Regeln, die festlegen, wie Informationen und Werthaltungen zu einem Bewertungsurteil verknüpft werden (Abb. 3). Ein planmäßiges Vorgehen zur konkreten Umsetzung einer oder mehrerer Bewertungslogiken, das zudem regelt, wie die Einflußgrößen der Bewertung gewonnen, strukturiert und miteinander verknüpft werden, wird als Bewertungsmethode bezeichnet [Stahl 1999; UBA 1995].

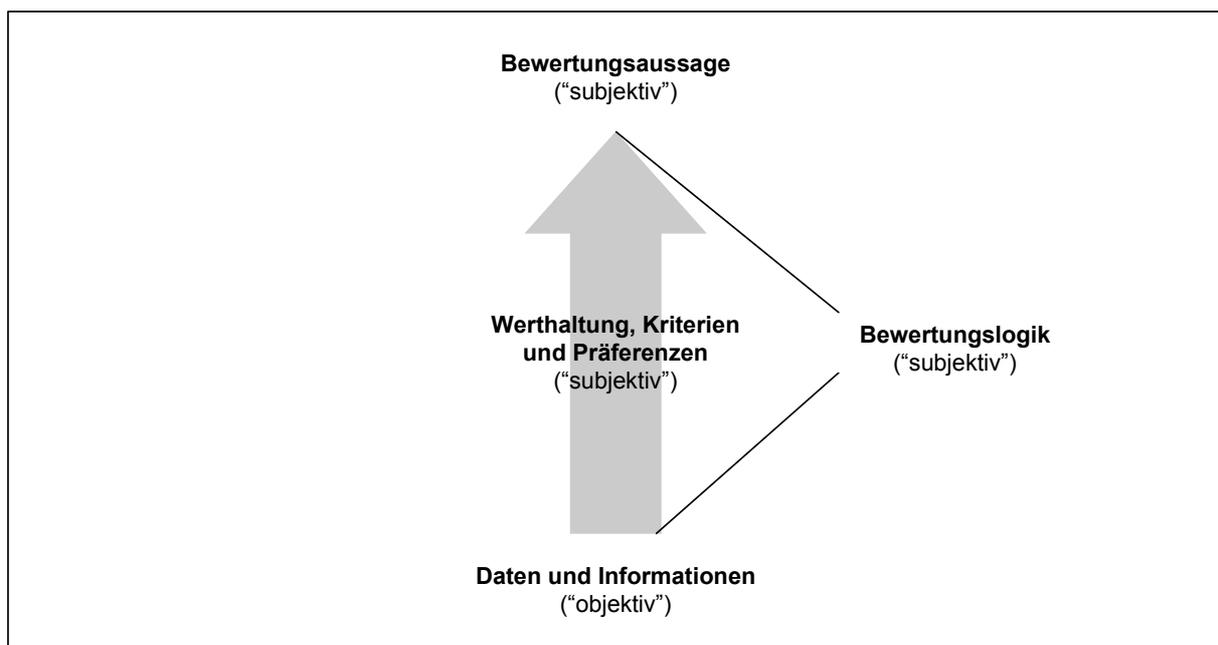


Abb. 3: Allgemeines Prinzip einer Bewertung [Giegrich 1995]

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die ökologische und ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien, d.h. die Bewertung wertschöpfender Prozesse und Technologien zur Umwandlung von Rohmaterialien, Halbzeugen, Bauteilen und Hilfsstoffen in Fertigteile, Produkte und Abfälle mittels Fertigungs-, Meß-, Lager- und Transportmitteln und unter Zuhilfenahme von menschlicher Arbeitsleistung (Personal), Informationen und Energie [Dangelmaier 1999; Warnecke 1998]. Bei einer ökologischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien werden diese hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen beurteilt. Unter dem Begriff der (betrieblichen) Umweltwirkung, oder auch Umweltauswirkung, versteht man im allgemeinen jede durch die Tätigkeit des betrachteten Unternehmens verursachte Auswirkung auf die Umwelt, d.h. jede - günstige oder ungünstige - Veränderung der Umgebung, in der eine Organisation tätig ist [ISO 14001, 1996]. Hierzu gehören globale, regionale und lokale Wirkungen, wie z.B. Klimabeeinflussung, Luft- und Gewässerbelastung, Abfallaufkommen oder Ressourcenbeanspruchung [BUM/UBA 1995]. Im Gegensatz dazu dient die ökonomische Bewertung der Ermittlung und Beurteilung der von den betrachteten Produktionsprozessen und -technologien verursachten Kosten und ihrer Wirtschaftlichkeit.

Unter dem im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendeten Begriff einer integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung ist daher die gemeinsame und aufeinander abgestimmte Bewertung von Umweltwirkungen und Kosten zu verstehen. Um den Prozeß der Bewertung und Entscheidungsfindung wirkungsvoll zu unterstützen, ist es nicht nur notwendig, die benötigten Informationen zu identifizieren, zu ermitteln und für eine Entscheidung aufzubereiten, sondern auch die Zusammenhänge zwischen Umweltwirkungen und Kosten aufzuzeigen [Spengler 2001; Barankay 2000]. Dabei ersetzt die Bewertung jedoch nicht die eigentliche Entscheidung, sondern dient vielmehr der Entscheidungsvorbereitung [Mai 1994].

Nachfolgend werden die allgemein beschriebenen Aufgaben einer Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionstechnologien in die übergeordneten Aufgabenstellungen des Produktions-, Umwelt- und Kostenmanagements eingeordnet, um daraus in Kap. 2.3 das konkrete Einsatzgebiete der Methode abzuleiten und einzugrenzen.

## **2.2 Einordnung der Aufgabenstellung**

### **2.2.1 Bezug zu Aufgaben des Produktionsmanagements**

Die übergeordnete Aufgabe des Produktionsmanagements besteht in der Umsetzung strategischer Unternehmensziele für den Bereich der betrieblichen Leistungserstellung durch eine zielorientierte Planung und Steuerung der Produktion. Je nach betrachtetem Zeithorizont wird zwischen strategischem, taktischem und operativem Produktionsmanagement unterschieden [Spengler 1998; Warnecke 1993a].

Ein Schwerpunkt des strategischen Produktionsmanagements, dem üblicherweise ein Planungshorizont größer als 5 Jahre zugeordnet wird, ist die Ziel- und Strategiefindung für das Produktionssystem sowie die langfristige Planung von Maßnahmen zu seiner Gestaltung und der darin ablaufenden Prozesse [Dyckhoff 2000; Dangelmaier 1999; Spengler 1998]. Im Kontext dieser Arbeit sind insbesondere die Aufgaben des Technologiemanagements und der langfristigen Investitionsprogrammplanung relevant. Bei der Planung des Einsatzes neuer Technologien und der zukünftigen Struktur der Produktionsbetriebe sind u.a. neue leistungsfähige Produktionstechniken durch systematisches Beobachten frühzeitig zu erkennen und ihre grundsätzliche Wirtschaftlichkeit zu beurteilen [Warnecke 1993a]. Im Rahmen des strategischen Produktionsmanagements kann eine Methode zur ökologischen und ökonomischen Bewertung Unterstützung bei der Entwicklung und Bewertung neuer Produktionstechnologien und -prozesse leisten.

Das taktische Produktionsmanagement umfaßt in der Regel einen Planungshorizont von 1 bis 5 Jahren, und übernimmt mit der Methoden- und Betriebsmittelplanung Aufgaben der Fertigungsplanung [Dubbel 2001; Spengler 1998]. Unterstützungsbedarf durch eine geeignete Bewertungsmethode besteht insbesondere bei der konkreten Ausplanung von Produktionssystemen, bei Investitionsentscheidungen und bei Entscheidungen hinsichtlich des Einsatzes neuer Produktionstechnologien sowie der Identifizierung der "besten verfügbaren Technologie".

Der optimale Einsatz eines bereits bestehenden Produktionsapparates ist dagegen die Hauptaufgabe des operativen Produktionsmanagements. Dementsprechend kurz ist der Planungshorizont von üblicherweise unter einem Jahr, da Aufgaben der Arbeitsvorbereitung, wie Material- und Verfahrensauswahl sowie Fertigungs- und Betriebsmittelauswahl dominieren [Böhlke 1994]. Mögliches Einsatzgebiet einer Methode zur ökologischen und ökonomischen Bewertung ist hier die Analyse und Bewertung bestehender Prozesse mit dem Ziel ihrer ganzheitlichen Optimierung.

### **2.2.2 Bezug zu Aufgaben des Umweltmanagements**

Eine Ökologie- und Ökonomieaspekte integrierende Bewertung von Produktionsprozessen liefert die Grundlagen für eine Verbesserung der Umweltleistungen des Unternehmens und leistet damit einen Beitrag zur Erfüllung der Aufgaben und Ziele des Umweltmanagements [Jürgens 1999; Nagl 1993]. Insbesondere werden die Aufgaben des Öko-Controllings unterstützt, dem im Rahmen des betrieblichen Umweltmanagements eine wichtige führungsunterstützende und abteilungsübergreifende Querschnittsfunktion zukommt (Abb. 4) [Janzen 2001; BUM/UBA 1996; UBA 1995; Schaltegger 1992; Molthan 1992].

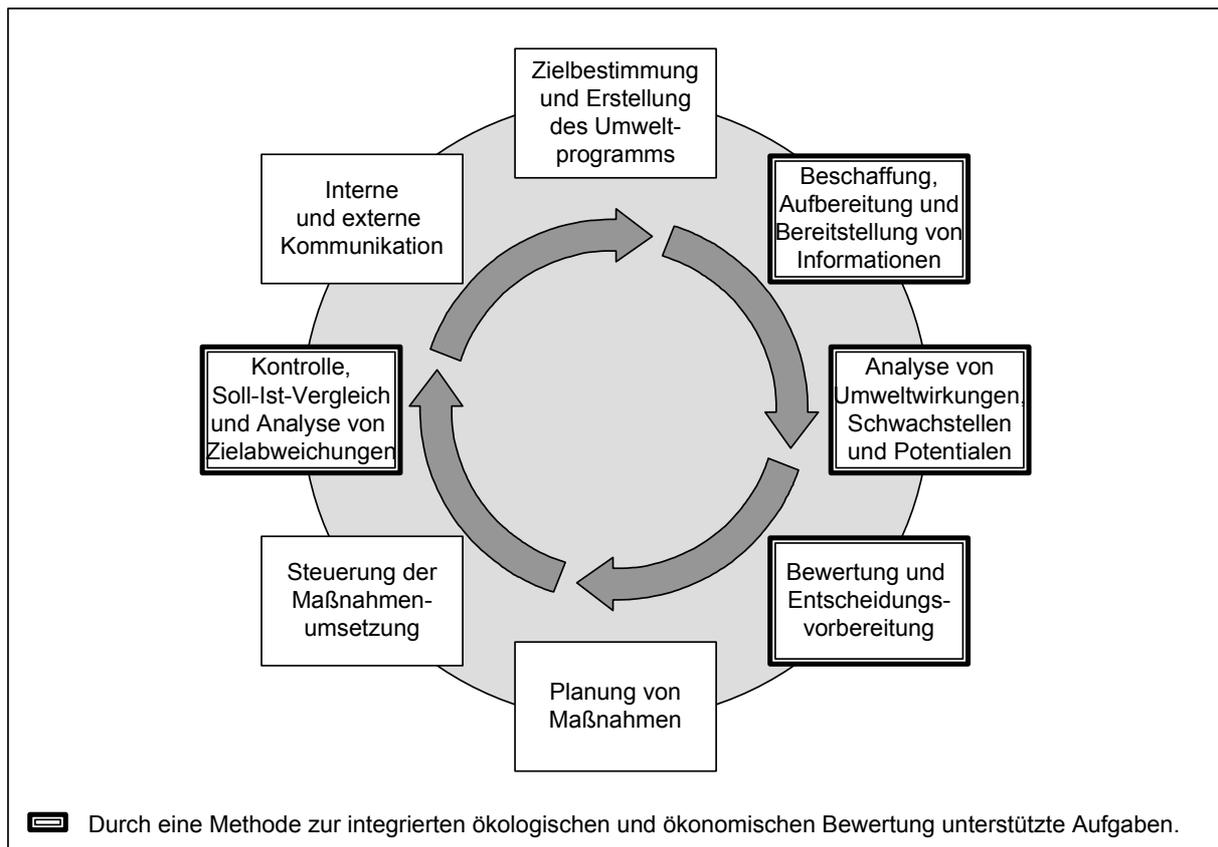


Abb. 4: Unterstützung von Aufgaben des Umweltmanagements im Rahmen des Öko-Controllings [Spengler 1998; BUM/UBA 1995; Schaltegger 1992; Molthan 1992]

Zur Umsetzung dieser Aufgaben lassen sich drei Ansätze des Öko-Controllings unterscheiden [Schaltegger 1995]: Beim finanziell orientierten Ansatz stellt Öko-Controlling lediglich eine umweltorientierte Differenzierung des Controllings und Rechnungswesens dar, bei der die ökonomischen Auswirkungen ökologieinduzierter Maßnahmen monetär bewertet werden. Im Gegensatz dazu dient beim ökologisch orientierten Ansatz die verursachte Umweltbelastung als Meßgröße. Dies erfordert eine Erweiterung des Controllings bzw. den Aufbau eines parallelen Instruments, um die ökologischen Auswirkungen unternehmerischer Entscheidungen ermitteln und steuern zu können. Ansätze, die darauf abzielen, sowohl die ökologischen Wirkungen ökonomischer Entscheidungen, als auch die ökonomischen Auswirkungen ökologieinduzierter Entscheidungen zu ermitteln, befinden sich noch weitgehend in der Entwicklungsphase (s. auch Diskussion der bestehenden Methoden in Kap. 3.3).

Ordnet man die Problemstellung dieser Arbeit in die Aufgaben des Umweltmanagements ein, so ist eine starke Überdeckung mit den Zielen und Aufgaben des Öko-Controllings festzustellen. Allerdings fehlt sowohl im Umweltmanagement, als auch im Öko-Controlling eine ausgeprägte taktische Ebene [Faßbender 2001]. Dies unterstreicht die bereits in Kap. 1 beschriebene Situation, daß betrieblicher Umweltschutz bislang in erster Linie nachsorgend betrieben wird und auf die Optimierung bestehender Strukturen und Prozesse abzielt. Bei der aktiven Planung und Gestaltung a priori ganzheitlich optimaler Systeme besteht dagegen ein deutliches Defizit, zumal umweltorientierte Planungsmittel fast

gänzlich fehlen [Kühnle 1995a; Böhlke 1994]. Insbesondere hier kann eine Methode für eine integrierte ökologische und ökonomische Bewertung einen wichtigen Beitrag leisten, um die geplanten Produktionsprozesse hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit und der Erfüllung unternehmerischer Umweltziele zu bewerten [Ahrend 1996].

### **2.2.3 Bezug zu Aufgaben des Kostenmanagements**

Aufgabe des Kostenmanagements im Unternehmen ist die Gestaltung von Produkten, Prozessen und Potentialen nach Kostenkriterien mit dem Ziel der Kostenminimierung [Dellmann 1994; Reiß 1992]. Hierzu ist die Untersuchung und Beeinflussung der Zusammenhänge zwischen Kosten und ihren Einflußfaktoren erforderlich. Das Kostenmanagement greift dabei auf die Investitionsrechnung als strategische Planungsrechnung und auf die Kostenrechnung als klassisches operatives System zurück [Baden 1998; Männel 1995].

In den letzten Jahren ist jedoch vermehrt die Erkenntnis gewachsen, daß das betriebliche Rechnungswesen nicht in der Lage ist, die für langfristig orientierte Planungs- und Managementaufgaben erforderlichen Informationen zu liefern [Horváth 1998]. Der Grund liegt v.a. in der häufig unzutreffenden, d.h. nicht verursachungsgerechten Verrechnung von Gemeinkosten, was zu einem falschen Bild der tatsächlichen Kostensituation und -zusammenhänge und zu einer falschen Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Prozessen und Produkten führen kann [Hartmann 1993; Bronner 1964]. Da jedoch eine gezielte Beeinflussung von Kosten eine differenzierte produkt- und prozeßabhängige Erfassung derselben voraussetzt, wird der klassischen Kostenrechnung immer mehr die Eignung als Entscheidungsinstrument abgesprochen und ihr statt dessen eher die Aufgabe einer nachrangigen derivativen Planungsrechnung zugewiesen [Baden 1998 ; Eversheim 1995; Hartmann 1993].

Die genannten Gründe haben daher zur Entwicklung eines strategieorientierten Kostenmanagements geführt, das darauf abzielt, durch langfristige Antizipation und Gestaltung von Kostenniveau, -struktur und -verlauf von Produkten und Prozessen einen Wettbewerbsvorteil zu schaffen bzw. zu sichern. Eine wichtige Aufgabe in diesem Zusammenhang ist die Unterstützung des strategischen Planungs- und Kontrollprozesses mit relevanten, bewertenden Kosteninformationen [Horváth 1998]. Wesentliche Unterschiede zur traditionellen, kurzfristig operativen Kostenrechnung bestehen in einer detaillierteren Betrachtung des heterogenen Fixkostenblocks und der Verwendung differenzierter, mengen- und prozeßorientierter sowie situationsabhängiger Bezugsgrößen. Ferner verwenden betriebswirtschaftliche Entscheidungsinstrumente zunehmend Partialmodelle, die sich in der Betrachtung auf wesentliche Zielwirkungen konzentrieren [Baden 1998].

Hinsichtlich Verfahren und Instrumenten greift eine strategische Kostenrechnung u.a. auf Target Costing, Benchmarking, Prozeßkostenrechnung und Life Cycle Costing zurück, wobei bei der Mehr-

zahl der Verfahren die Zielwirkungen einer fiktiven Durchschnittsperiode betrachtet werden. Strategisches Kostenmanagement stellt somit nur eine Erweiterung des betrieblichen Rechnungswesens dar, wobei zunehmend gefordert wird, traditionelle Kostenrechnung, Investitionsrechnung und strategisches Kostenmanagement enger aufeinander abzustimmen und miteinander zu verknüpfen [Hummel 2000; Baden 1998; Horváth 1998]. Ein eigenständiges "taktisches Kostenmanagement" als Verbindungselement von strategischem und operativem Kostenmanagement ist nicht bekannt.

Zwischen den Aufgaben und Zielen des strategieorientierten Kostenmanagements und einer ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen besteht eine Überdeckung hinsichtlich der langfristigen Beeinflussung und der angestrebten optimalen Gestaltung der Kostensituation im Produktionsbereich, um auch zukünftigen, steigenden Anforderungen gerecht werden zu können. Bei der Konzeption einer entsprechenden Bewertungsmethode für Produktionsprozesse gilt es insbesondere, den Aspekt der Abstimmung mit den unterschiedlichen Ansätzen und Aufgaben des Kostenmanagements zu beachten, um einerseits die Entscheidungsprozesse und Aufgaben des strategieorientierten Kostenmanagements effektiv unterstützen zu können und andererseits auch eine Kompatibilität zu den in den Unternehmen üblichen operativen Kostenrechnungssystemen zu gewährleisten.

### **2.3 Eingrenzung des Anwendungsgebiets**

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, daß eine Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien einzelne Aufgaben des Produktions-, Umwelt- und Kostenmanagements unterstützt. Als Schwerpunkt für die Anwendung einer solchen Methode empfiehlt sich jedoch das Produktionsmanagement, da dort mit der Planung und Realisierung von Investitionen die Rahmenbedingungen und Leistungen einer zukünftigen Produktion langfristig festgelegt bzw. im laufenden Betrieb beeinflußt werden können [Schenk 2001; Schweres 1999]. Unter Berücksichtigung des Zeithorizonts ergeben sich dabei folgende wesentliche Einsatzgebiete im Rahmen des Produktionsmanagements:

- Entwicklung und Bewertung neuer Produktionstechnologien (strategische Ebene).
- Planung neuer Produktionsprozesse und Investitionsentscheidungen (taktische Ebene).
- Optimierung bestehender Produktionsprozesse (operative Ebene).

Die mit diesen Einsatzgebieten verbundenen Bewertungsaufgaben sind in Tab. 1 näher charakterisiert.

Unterstütztes Einsatzgebiet		Bewertungs-aufgabe	Bewertungs-objekt	Art der Bewertung	Angestrebte Aussage	Daten-verfügbarkeit
strategisch	Entwicklung neuer Produktionstechnologien	Hinweise zur Gestaltung a priori ganzheitlich optimaler Technologien	Neuer, meist nicht realisierter u. nicht spezifizierter Prozeß im Vgl. zu konkreten Ist-Prozessen	Eher absolute Bewertung, evtl. auch relativ im Vergleich zu konventionellen Technologien	Allgemeingültige absolute oder relative Pauschalaussage	Für neue Technologien i.d.R. keine Daten verfügbar, da Prozesse noch nicht existieren
	Bewertung neuer Produktionstechnologien	Entscheidungsunterstützung hins. Einführung einer neuen Technologie	Neuer, meist nicht spezifizierter Prozeß im Vergleich zu Ist-Prozessen	Eher absolute Bewertung, evtl. auch relativ im Vergleich zu konventionellen Technologien	(Zumeist) allgemeingültige absolute oder relative Pauschalaussage	Für neue Technologien i.d.R. kaum Daten verfügbar, da Referenzprozesse weitgehend fehlen
taktisch	Planung neuer Produktionsprozesse/ Investitionsentscheidungen	Bestimmung der ökologisch u. ökonomisch optimalen Alternative	Mehrere, meist spezifizierte Prozeßalternativen	Prinzipiell absolute Bewertung, jedoch relative Bewertung der Alternativen i.d.R. ausreichend	Absolute Aussage bei Einzelbewertung Präferenzordnung bei Alternativen	Planungsdaten, i.d.R. aus vergleichbaren Prozessen ableitbar
operativ	Optimierung bestehender Prozesse	Ermittlung ökologischer und wirtschaftlicher Optimierungspotentiale	Existierender, spezifischer (Ist-)Prozeß und mögliche Optimierungsansätze	Relative Bewertung mit Ist-Prozeß als Referenz	Relative Aussagen: Veränderung der Umweltwirkungen und Kosten	Ist-Daten vorhanden oder relativ leicht ermittelbar

Tab. 1: Charakterisierung der Bewertungsaufgaben im Rahmen des Produktionsmanagements

Auf strategischer Ebene besteht bei der Entwicklung und Bewertung neuer Technologien das Dilemma, daß hier einerseits die Möglichkeiten der Einflußnahme und der Gestaltung am größten sind, andererseits in der Regel nicht die erforderlichen Daten zur Verfügung stehen, um detaillierte und eindeutige Bewertungsaussagen zu generieren. Hinzu kommt, daß konkrete quantitative Aussagen zu Umweltwirkungen und Kosten nur unter Berücksichtigung unternehmens-, prozeß- und produktspezifischer Randbedingungen möglich sind. Eine Bewertung von Produktionstechnologien an sich ist daher extrem schwierig, leichter dagegen ihre Anwendung im Rahmen betrieblicher Prozesse.

Dementsprechend vergleichsweise einfach durchführbar sind daher sukzessive Ver- und Nachbesserungen an bestehenden Produktionsprozessen auf operativer Ebene. Allerdings lassen sich hierbei - im Vergleich zu produkt-, werkstoff- und verfahrenstechnischen Innovationen - lediglich relativ geringe Rationalisierungspotentiale erschließen [Eversheim 1996].

Der Einsatz einer integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung auf taktischer Ebene verspricht dagegen den größten Effekt, da mit der Planung und Realisierung von Investitionen die Rahmenbedingungen der zukünftigen Produktion - und damit die Auswirkungen auf die Umwelt und die Kostenstrukturen - auf Jahre hinaus festgelegt werden [Schweres 1999]. Auf der anderen Seite lassen sich die später zu erwartenden Umweltbelastungen und Kosten mit vergleichsweise geringem Aufwand minimieren, wenn ökologische und ökonomische Aspekte bereits während der Planung der Produktionsprozesse einbezogen werden [Bullinger 1999]. Hieraus ergibt sich der Bedarf, Planungsergebnisse bereits in möglichst frühen Phasen eines Projektes nach unterschiedlichen Kriterien einer Bewertung zu unterziehen [Schenk 2001]. Auf diese Weise können zeit- und kostenintensive nachträgliche Optimierungsschleifen vermieden werden und die neuen Produktionsprozesse können schneller umgesetzt werden.

Mit einer frühzeitigen Einbeziehung einer ökologischen und ökonomischen Bewertung in die Produktionsplanung wird sichergestellt, daß die geplanten Produktionsprozesse nicht nur eine optimale Erfül-

lung der Produktionsaufgabe aus technischer Sicht gewährleisten, sondern zugleich möglichst umweltgerecht und wirtschaftlich sind. Vor diesem Hintergrund wird der Fokus im weiteren Verlauf der Arbeit auf die taktische Produktionsplanung gelegt, wobei die Bewertung von Technologien, Investitionen und Prozessen im Mittelpunkt steht.

Im Gegensatz zu einer Bewertung auf strategischer Ebene erfolgt eine Technologiebewertung im Rahmen der taktischen Produktionsplanung vor dem Hintergrund eines konkreten, potentiellen Anwendungsfalls, z.B. eines Produktspektrums, und unter Berücksichtigung allgemeiner betrieblicher Rahmenbedingungen. Die Bewertung dient der Vorauswahl von Produktionstechnologien und unterstützt bei der Identifizierung der im Öko-Audit geforderten "besten verfügbaren Technologie". Bei einer Investitionsbewertung ist der Fokus auf eine genau definierte Produktionsaufgabe eingeeignet. Ziel einer Bewertung ist hier die Ermittlung der unter ökologischen und ökonomischen Aspekten optimalen Planungsalternative und die Vorbereitung konkreter Investitionsentscheidungen. Der Unterschied zwischen einer Investitions- und einer Prozeßbewertung liegt in der zugrunde gelegten Bezugsgröße. Denn während bei der Investitionsbewertung der Gesamtnutzen einer Investition betrachtet wird, wird bei der Prozeßbewertung die einmalige Durchführung eines Prozesses, i.d.R. zur Herstellung eines Produktes untersucht. Neben der Bewertung von Planungsergebnissen kann eine Prozeßbewertung auch dazu eingesetzt werden, die Planungsabläufe zu unterstützen sowie Ansatzpunkte für eine Optimierung bestehender Prozesse im Rahmen des operativen Produktionsmanagements zu identifizieren.

Mit der Ermittlung und Bewertung der zu erwartenden ökologischen und ökonomischen Auswirkungen wird von der Methode ein Beitrag zur effektiven Unterstützung der Planung neuer Produktionsprozesse und -anlagen sowie der Vorbereitung von Entscheidungen bezüglich Einführung und Einsatz neuer Produktionstechnologien erwartet.

### **3 Stand der Technik**

In diesem Kapitel wird der Stand der Methodenentwicklung zur ökologischen und ökonomischen Bewertung dargestellt, um zu untersuchen, inwieweit bereits existierende Ansätze zur Bewertung von Produktionsprozessen und -verfahren für die zuvor beschriebenen Aufgaben im Rahmen der taktischen Produktionsplanung geeignet sind. Die überwiegende Mehrheit der vorgestellten Ansätze entstammt dem Umweltmanagement bzw. Öko-Controlling oder dem Kostenmanagement bzw. der Betriebswirtschaftslehre, während nur wenige rein ingenieurwissenschaftliche Konzepte existieren.

Der besseren Übersicht wegen erfolgt eine Einteilung der Methoden gemäß ihrer Schwerpunkte in

- Methoden zur ökologischen Bewertung,
- Methoden zur ökonomischen Bewertung und
- Methoden zur ökologischen und ökonomischen Bewertung.

Aufgrund der großen Anzahl der Ansätze kann es sich bei den nachfolgend beschriebenen Methoden nur um eine Auswahl handeln, die jedoch den Stand der Wissenschaft auf diesem Gebiet umfassend repräsentiert.

#### **3.1 Methoden zur ökologischen Bewertung**

Umweltmanagement und Öko-Controlling sind noch relativ junge Disziplinen der Unternehmensforschung, so daß eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze existiert und sich noch kein in sich konsistentes Theorie- und Methodengebäude entwickeln konnte. Insgesamt dominieren Methoden zur Produktbewertung, jedoch sind auch erste Ansätze zur Prozeßbewertung bekannt. Erforderlich ist daher eine systematische Analyse und Beurteilung, inwieweit die Methoden auch für Bewertungsaufgaben im Rahmen einer taktischen Produktionsplanung geeignet sind.

In Kap. 3.1.1 werden zunächst die wichtigsten Ansätze zur Ermittlung und Aufbereitung einer Datenbasis für eine ökologische Bewertung vorgestellt, da die meisten der in Kap. 3.1.2 beschriebenen Methoden primär auf den Schritt der Bewertung fokussieren und eine entsprechende Datenbasis als gegeben voraussetzen.

### 3.1.1 Methoden zur Ermittlung und Aufbereitung einer Datenbasis für eine ökologische Bewertung

Fast allen Methoden des Umweltmanagements und Öko-Controllings liegt einer der in Abb. 5 dargestellten Ansätze zur Ermittlung umweltrelevanter Grunddaten zugrunde. Eine der wichtigsten und grundlegendsten Methoden ist die der Ökobilanzierung. Der Terminus "Ökobilanz" ist als Oberbegriff für eine bilanzierende und meist auch beurteilende Betrachtung eines Systems nach ökologischen Kriterien zu sehen und steht für eine möglichst umfassende Abschätzung der mit einem Untersuchungsobjekt verbundenen Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen [ISO 14040, 1997; BUM/UBA 1995; Kensy 1993]. Kern einer jeden Ökobilanz ist die Gegenüberstellung der In- und Outputs des untersuchten Systems, wobei der Grundsatz der Massen- und Energieerhaltung gilt [Meffert 1992].

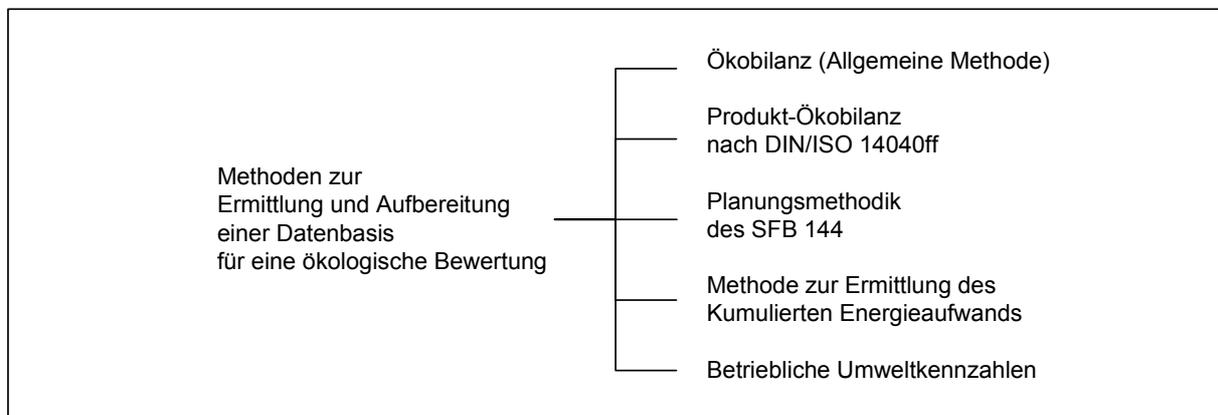


Abb. 5: Übersicht eingeführter Methoden zur Ermittlung und Aufbereitung einer Datenbasis für eine ökologische Bewertung (Auswahl)

Die Normenreihe DIN EN ISO 14040-14042 repräsentiert den derzeitigen Stand der wissenschaftlichen Diskussion und definiert eine allgemein anerkannte Vorgehensweise zur Erstellung von Produkt-Ökobilanzen, die auch auf Prozeß- und Betriebsbilanzen übertragbar ist [Pick 2001]. Das wesentliche Defizit der Methode besteht darin, daß Rahmenbedingungen und einzuhaltende Kriterien nur allgemein beschrieben werden. Dabei wird (bewußt) offengelassen, *wie* - d.h. nach welchen spezifischen Verfahren - die Ermittlung der Sachbilanzdaten, die Abschätzung der Wirkungen und die Bewertung konkret erfolgen sollten [ISO 14042, 2000]. Für eine Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung im Rahmen der taktischen Produktionsplanung ergibt sich die Notwendigkeit, den Ansatz der Ökobilanzierung hinsichtlich der Datenermittlung weiter zu operationalisieren, auf die Belange einer Prozeßbewertung anzupassen und um betriebswirtschaftliche Aspekte zu ergänzen.

Eine Abwandlung der allgemeinen Form der Ökobilanz ist die im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 144 "Energie- und Rohstoffeinsparung - Methoden für ausgewählte Prozesse" der RWTH Aachen entwickelte Planungsmethodik zur Analyse und Bewertung von produktionstechnischen Ent-

scheidungsalternativen hinsichtlich ihres resultierenden Bedarfs an ökologischen Ressourcen [Eversheim 1996].<sup>1</sup> Im Gegensatz zur Produkt-Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040ff ist die Methode explizit für die Bewertung von Produktionsprozessen konzipiert. Wesentliche Merkmale sind die Beschränkung auf Inputflüsse und die Verwendung von Ressourcenbedarfsfunktionen und Arbeitsplänen zur Ermittlung der Bilanzierungsdaten. Für die Praxis ist eine derartige Form der Datenermittlung jedoch viel zu aufwendig und der zu erwartende Fehler zu groß, so daß die Methode für eine integrierte Bewertung im Sinne der zuvor beschriebenen Problemstellung als nicht geeignet einzustufen ist.

Eine in der Praxis dagegen häufig eingesetzte Methode ist die an der TU München entwickelte und mittlerweile als VDI-Richtlinie festgeschriebene Methode zur Ermittlung des Kumulierten Energieaufwands (KEA) [VDI 4600, 1987]. Die Methode liefert anschauliche Ergebnisse und erscheint - zumindest auf den ersten Blick - schneller und unkomplizierter als die Erstellung einer vollständigen Ökobilanz.<sup>2</sup> Allerdings stellt der KEA nur *einen* wichtigen Kennwert für eine ökologische Bewertung dar, andere Auswirkungen auf die Umwelt werden nicht betrachtet [Eyerer 1996a]. Da eine vollständige ökologische Bewertung auf dieser eingeschränkten Datenbasis nicht möglich ist, erscheint eine reine Energiebetrachtung nicht zielführend und wird in der betrieblichen Praxis häufig überbewertet.

Für eine systematische Darstellung und Verdichtung der Ergebnisse der Datenermittlung bieten sich Umweltkennzahlen an [Pape 2001; Nagel 1999; BUM/UBA 1997; BUM/UBA 1995]. Im Vergleich zu betriebs- und finanzwirtschaftlichen Kennzahlen stehen Umweltkennzahlen jedoch noch am Anfang der Entwicklung. Eine Gesamt-Umweltkennzahl als Pendant etwa zum Unternehmensgewinn als ökonomische Spitzenkennzahl existiert nicht und ist bis auf weiteres auch nicht absehbar [Opierzynski 1999]. Umweltkennzahlen stellen für sich genommen noch keine Bewertung dar und eignen in der vorliegenden Form sich somit nur für eine Systematisierung von Sachinformationen. In Tab. 2 sind die wesentlichen Merkmale der beschriebenen Methoden noch einmal gegenübergestellt.

Zusammenfassend kann die Ökobilanzierung als die grundlegende Methode des Umweltmanagements schlechthin zur Ermittlung und Aufbereitung einer umfassenden Datengrundlage für eine ökologische Bewertung bezeichnet werden. Dies zeigt sich unter anderem darin, daß nahezu alle Bewertungsmethoden im Rahmen des Umweltmanagements für eine ökologische Bewertung auf eine Form der Ökobilanz zur Ermittlung der Ausgangsdaten zurückgreifen. Insbesondere in ihrer Ausprägung nach DIN EN ISO 14040ff stellt die Methode der Ökobilanzierung den derzeit besten systematischen und allgemein akzeptierten Ansatz dar. Aufgrund der starken Produktorientierung der Norm, ist jedoch eine Anpassung an die besonderen Anforderungen einer Bewertung von Prozessen und Technologien erforderlich.

---

<sup>1</sup> Anmerkung: Da eine Bewertung der Ergebnisse nur ansatzweise skizziert wird, wird die Methode nur bei den Ansätzen zur Datenermittlung behandelt.

<sup>2</sup> Gemäß VDI-Richtlinie 4600 (Entwurf) ist zur Erstellung einer Energiebilanz jedoch ebenfalls eine vollständige Bilanzierung aller Stoff- und Energieflüsse über den gesamten Lebensweg des Untersuchungsobjekts erforderlich [VDI 4600, 1995].

Methoden	Leistung	Untersuchungsobjekt	Untersuchungsrahmen	Ermittelte Datengrundlage	Ergebnis
Ökobilanz (Allgemeine Methode)	Datenermittlung	Produkt, Prozeß, Betrieb	total, direkt, partiell	Stoffdaten, Energieverbrauch	Sachbilanz
Produkt-Ökobilanz (DIN EN ISO 14040ff)	Datenermittlung, Datenaufbereitung, (Bewertung)	Produkt, (Prozeß), (Betrieb)	total	Stoffdaten, Energieverbrauch, Umweltwirkungen	Sachbilanz, Wirkungsabschätzung
Planungsmethodik des SFB 144	Datenermittlung, Datenaufbereitung, (Bewertung)	Prozeß	partiell (nur 3 Stufen)	Stoffdaten (nur Input), Energieverbrauch	Ressourcenbedarf (Sachbilanz)
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	Datenermittlung, Datenaufbereitung, Bewertung	Produkt, (Prozeß), (Betrieb)	total	Energieverbrauch	Kumulierter Energieaufwand
Betriebliche Umweltkennzahlen	Datenaufbereitung	Betrieb, Unternehmen	direkt	Energieverbrauch	Kennzahlen zu Input/Output, Infrastruktur, Umweltmanagement u. -zustand
<i>Untersuchungsrahmen:</i> total      totale Bilanz (Lebensweg aller Flüsse) direkt     direkte Inputs/Outputs partiell   partielle Betrachtung					

Tab. 2: Charakterisierung eingeführter Methoden zur Ermittlung einer Datenbasis

### 3.1.2 Methoden zur ökologischen Bewertung der Datenbasis

Da die Kenntnis der Datenbasis alleine noch nicht ausreicht, um eine Entscheidung zu treffen, und eine Beurteilung der Auswirkungen auf die Umwelt nicht rein naturwissenschaftlich begründbar ist, ist eine Bewertung von Vor- und Nachteilen unter Berücksichtigung subjektiver Präferenzen erforderlich [ISO 14040, 1997; UBA 1992; Friedrich 1996; Molthan 1992]. Im Umweltmanagement bzw. Ökocontrolling existieren hierzu eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden und Ansätze [Müller-Christ 2001]. Bei den Methoden zur ökologischen Bewertung erfolgt eine Beurteilung des Untersuchungsobjekts ausschließlich nach umweltrelevanten Kriterien, wobei entweder Sachbilanzergebnisse oder Umweltwirkungen als Datenbasis herangezogen werden (Abb. 6).

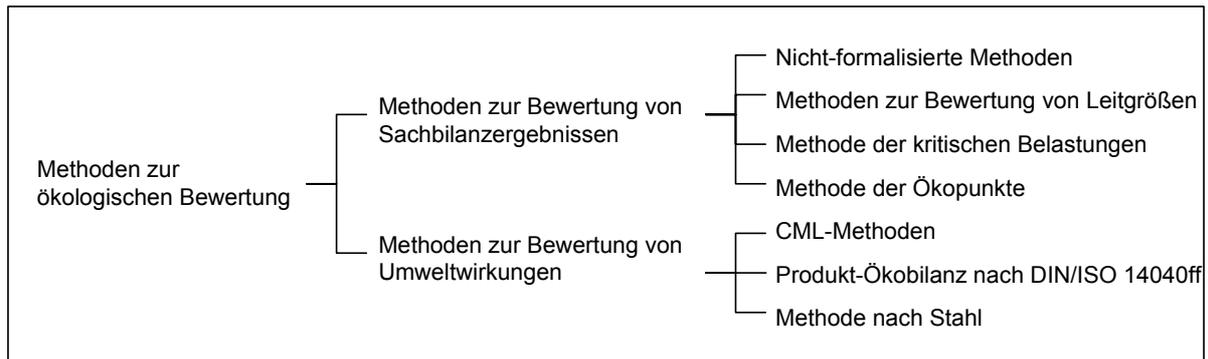


Abb. 6: Übersicht eingeführter Methoden zur ökologischen Bewertung (Auswahl)

Weitere wichtige Merkmale zur Differenzierung der Methoden sind die angewandte Bewertungslogik, die Art der Gewichtung und der Aggregationsgrad des Bewertungsergebnisses. Die in den unterschiedlichen Methoden zum Einsatz kommenden Bewertungslogiken lassen sich auf folgende fünf Grundmuster zurückführen [Giegrich 1995]:

- Bei verbal-argumentativen Ansätzen werden Teilaspekte der Datenbasis anhand einzelner Kriterien und auf Basis klar zu benennender Werthaltungen im Diskurs behandelt, um zu einem Gesamturteil zu kommen.
- Nutzwertanalytische Ansätze erfordern das Aufstellen eines Kriteriensystems und die Einschätzung von Zielerfüllungsgraden für die verschiedenen Kriterien. Durch Gewichtung der Kriterien und Zielerfüllungsgrade wird anschließend eine Gesamtaussage in Form eines Zahlenwertes generiert.
- Bewertungslogiken, die sich auf den Schaden-Nutzen-Ansatz zurückführen lassen, erfordern eine Projektion der Schadens- bzw. Nutzenaspekte auf eindimensionale Leitgrößen, die abschließend zu einer Gesamtgröße aggregiert werden.
- Bei einer Reihe von Ansätzen werden Ergebnisse von Einzelaspekten ins Verhältnis zu sogenannten "kritischen Größen" oder Zielvorgaben (z.B. gesetzlichen Grenzwerten) gesetzt und die so gewonnenen Indices zu einer Gesamtgröße aggregiert.
- Bei Bewertungslogiken mit einem hierarchischen Methodenansatz wird zunächst die Anzahl der Bewertungskriterien durch (paarweise) Vergleiche reduziert. Anschließend erfolgt eine Schlußeinschätzung anhand weniger Punkte. Derartige Logiken spielen jedoch eher eine untergeordnete Rolle.

In Tab. 3 sind die wesentlichen Unterschiede zwischen den gängigsten Methoden zur ökologischen Bewertung zusammengefaßt.

Methoden	Bewertungsgrundlage (Anz. Kategorien)	Bewertungslogik	Gewichtung	Skala	Ergebnisstruktur/Aggregation
Bewertung auf Basis von Kennzahlen	Sachbilanz	v-a	Präf, Ziele	Kardinal	verbal-argumentativ
ABC-Methode	Sachbilanz	v-a	Ziele, Präf	Ordinal	verbal-argumentativ
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	Sachbilanz (1 Kat.)	SN	LG	Kardinal	1 Kennzahl: Energieaufwand
Materialintensität (MIPS)	Sachbilanz (1 Kat.)	SN	LG	Kardinal	1 Kennzahl: Ressourcenverbrauch
Methode der Kritischen Belastung	Sachbilanz	KG, v-a	Ziele	Kardinal	4 Kennzahlen: Abfall, Energie, Wasser, Luft
Ökologische Buchhaltung	Sachbilanz	KG	Ziele	Kardinal	1 Kennzahl: Umweltbelastungspunkte
CML-Methoden (CML, VNCI, Eco-Indicator)	Wirkungsabschätzung (9 bzw. 14 Kat.)	NWA	Norm, Ziele, Präf	Ordinal	1 Kennzahl: Umweltindex, Environmental yield bzw. Ökopunkte
UBA	Wirkungsabschätzung (10 Kat.)	v-a	Norm, Ziele, Präf	Kardinal	verbal-argumentativ
Methode nach Stahl	Wirkungsabschätzung (7 Kat.)	NWA	Norm, Ziele, Präf	Kardinal	1 Kennzahl: Umweltbelastungsindex
<i>Bewertungslogik:</i> v-a verbal-argumentativer Ansatz NWA nutzwertanalytischer Ansatz SN Schaden-Nutzen-Ansatz  KG Ansatz der kritischen Größe			<i>Art und Ableitung der Gewichtung:</i> LG Leitgröße Norm Normalisierung Ziele Umweltstandards und -ziele, gesetzliche Vorgaben, Politik, Ziele des Bewertenden Präf Präferenzen des Bewertenden oder mit Hilfe sozialwissenschaftlicher Methoden (z.B. Befragungen) ermittelt		

Tab. 3: Charakterisierung eingeführter Methoden zur ökologischen Bewertung

Da die Höhe von Umweltbeeinträchtigungen nicht notwendigerweise proportional zu den im Rahmen der Sachbilanz ermittelten Emissionen ist, sind Sachbilanzergebnisse nur bedingt für eine ökologische Bewertung geeignet [Friedrich 1996]. Statt dessen empfiehlt sich eine auf naturwissenschaftlich begründeten und nachvollziehbaren Modellansätzen beruhende Wirkungsabschätzung [Schwarz 1997]. Auf diese Weise reduziert sich die Gefahr, weniger relevante Leitparameter herauszugreifen und falsche Schlussfolgerungen zu ziehen [Saur 1996b; Schwarz 1997]. Als systematische Vorgehensweise haben sich hierzu die Schritte "Klassifizierung" und "Charakterisierung" weitgehend durchgesetzt (z.B. CML-Methode, DIN EN ISO 14043 und Methode nach Stahl) [Stahl 1999]. Teilweise bestehen allerdings noch unzureichende Kenntnisse bezüglich der Wirkungsmechanismen und Datenlücken, so daß sich derzeit noch nicht alle Auswirkungen auf die Umwelt quantifizieren lassen [Saur 1996b]. Wie die Normungsaktivitäten belegen, zeichnet sich auch eine zunehmende Akzeptanz der weiterführenden Schritte "Normalisierung" und "Gewichtung" ab, um die ermittelten Umweltwirkungen weiter zu verdichten und zu einer aussagekräftigen Bewertungsgröße zu aggregieren. Zwar gibt es für eine wirkungsartenübergreifenden Bewertung keine naturwissenschaftliche Grundlage, aber die Unternehmensführung erfordert in der Praxis möglichst eindeutige und hochaggregierte Aussagen. Vor dem

Hintergrund, daß Entscheidungen letztendlich immer subjektiven Einflüssen unterliegen, erscheint eine solche Vorgehensweise daher legitim [Eberle 2000]. Die von Stahl entwickelten Ansätze stellen dabei eine brauchbare und systematische Operationalisierung der DIN EN ISO 14043 dar.

## **3.2 Methoden zur ökonomischen Bewertung**

In Kap. 3.2.1 und 3.2.2 werden Methoden zur ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen vorgestellt, die überwiegend dem Kostenmanagement zuzurechnen sind und als Datenbasis auf das betriebliche Rechnungswesen zurückgreifen, das in den einzelnen Unternehmen unterschiedlich ausgeprägt sein kann.<sup>1</sup> Die Ansätze können zum einen in Methoden zur Ermittlung der Produktionsprozessen zurechenbaren Kosten eingeteilt werden - hierbei handelt es sich im wesentlichen um Methoden der Kostenrechnung im weiteren Sinne - und zum anderen in Methoden zur Bewertung dieser Kosten, um eine Entscheidungsfindung zu unterstützen.<sup>2</sup> Die in Kap. 3.2.3 beschriebenen Methoden sind dagegen primär dem Umweltmanagement zuzurechnen und stellen einen Sonderfall der ökonomischen Bewertung dar, da sie nicht auf der betrieblichen Kostenrechnung basieren, sondern Ansätze zur Monetarisierung der Auswirkungen auf die Umwelt verwenden.

### **3.2.1 Methoden zur Ermittlung der Kosten von Produktionsprozessen**

Die quantitative Abbildung betrieblicher Leistungserstellungsprozesse hinsichtlich betriebswirtschaftlicher Sachverhalte erfolgt im Rechnungswesen und mit Hilfe der Kostenrechnung. Mit der Erfassung, Verteilung und Zurechnung der anfallenden Kosten werden Entscheidungsträgern die für eine betriebswirtschaftlich orientierte Planung, Steuerung und Kontrolle benötigten quantitativen Informationen zur Verfügung gestellt [Warnecke 1993b; Roth 1992; Heinen 1991].<sup>3</sup>

Entsprechend den Aufgaben der Kostenrechnung ergibt sich ihre Einteilung in Grundrechnung und Auswertungsrechnung: Die Grundrechnung dient der periodenbezogenen Erfassung der Kosten. Sie ist zweckneutral, rein datenbezogen und für verschiedene Auswertungsrechnungen geeignet. In der Aus-

---

<sup>1</sup> Eine Ausnahme bildet die an der RWTH Aachen konzipierte "Ressourcenorientierte Prozeßkostenrechnung", die ihren Ursprung in den Ingenieurwissenschaften hat, jedoch zur Gruppe der ökonomischen Bewertungen zu zählen ist.

<sup>2</sup> Anmerkung: Streng genommen stellt bereits die Ermittlung von Kosten eine Bewertung dar, da betrieblichen Sachverhalten monetäre Werte zugewiesen werden.

<sup>3</sup> Im Rahmen dieser Arbeit wird unter dem Begriff "Kosten" der in Geldeinheiten bewertete Verzehr an Gütern und Dienstleistungen im Rahmen der betrieblichen Leistungserstellung, des Absatzes der Produkte sowie zur Aufrechterhaltung der dafür benötigten Kapazitäten verstanden. [Horváth 1998; Warnecke 1993b; Wöhe 1986]

wertungsrechnung werden die ermittelten Daten für leistungsträger- oder periodenbezogene Aufgaben aufbereitet, wie z.B. der Vor- und Nachkalkulation von Produkten oder der Ermittlung des Betriebsergebnisses. Dementsprechend wird die Kostenartenrechnung häufig auch als Grundrechnung und die Kostenträgerrechnung (Kalkulation) als Auswertungsrechnung bezeichnet. Eine allgemeine Form der Kostenrechnung existiert nicht, vielmehr sind verschiedene Ausprägungen bzw. Entwicklungsformen bekannt. Eine Gliederung dieser Kostenrechnungssysteme kann einerseits nach Kosteninhalt (Ist-, Normal- und Plankostenrechnung) und andererseits nach Umfang der Kostenverrechnung auf die Kostenträger (Voll- und Teilkostenrechnung) erfolgen (Tab. 4 und Tab. 5) [Heinen 1991].

Umfang der Kostenverrechnung		Istkosten	Normal- und Istkosten	Plan- und Istkosten
Vollkostenrechnung	sämtliche fixe und variable Einzelkosten + sämtliche fixe und variable Gemeinkosten	klassische Vollkostenrechnung, Fixkosten-Deckungsrechnung	Normalkostenrechnung	starre und flexible Vollplankostenrechnung, Prozeßkostenrechnung
	nur variable Einzel- und Gemeinkosten	einstufiges und mehrstufiges Direct Costing	-	Grenzplankostenrechnung, Ressourcenorientierte Prozeßkostenrechnung
Teilkostenrechnung	nur Einzelkosten	Rechnung mit relativen Einzelkosten und -erlösen (nach Riebel)	-	Rechnung mit relativen Einzelkosten und -erlösen (nach Riebel)

Tab. 4: Entwicklungsformen der Kostenartenrechnung (Grundrechnung) [In Anl. an Heinen 1991]

Umfang der Kostenverrechnung		Istkosten	Normal- und Istkosten	Plan- und Istkosten
Vollkostenrechnung	sämtliche fixe und variable Einzelkosten + sämtliche fixe und variable Gemeinkosten	Divisionskalkulation (einstufig und mehrstufig) Zuschlagskalkulation (einstufig und mehrstufig) Herstellkostenrechnung • Platzkostenrechnung • Maschinenstundensatz • progressive/retrograde Kalkulation d. Fixkosten-Deckungsrechnung	Divisionskalkulation (einstufig und mehrstufig) Zuschlagskalkulation (einstufig und mehrstufig) • Herstellkostenrechnung • Platzkostenrechnung • Maschinenstundensatz	Divisionskalkulation (einstufig und mehrstufig) Zuschlagskalkulation (einstufig und mehrstufig) • Herstellkostenrechnung • Platzkostenrechnung • Maschinenstundensatz • progressive/retrograde Kalkulation d. Fixkosten-Deckungsrechnung
	nur variable Einzel- und Gemeinkosten	Deckungsbeitragsrechnung	-	Zuschlagskalkulation auf Grenzplankostenbasis, Ressourcenorientierte Prozeßkostenrechnung
Teilkostenrechnung	nur Einzelkosten	-*	-* * keine gesonderte Kostenträgerstückrechnung	-*

Tab. 5: Entwicklungsformen der Kostenträgerrechnung (Auswertungsrechnung)  
[In Anl. an Heinen 1991]

Von den verschiedenen Ansätzen werden nachfolgend die in Abb. 7 dargestellten Methoden zur Ermittlung der Kosten von Produktionsprozessen näher charakterisiert.

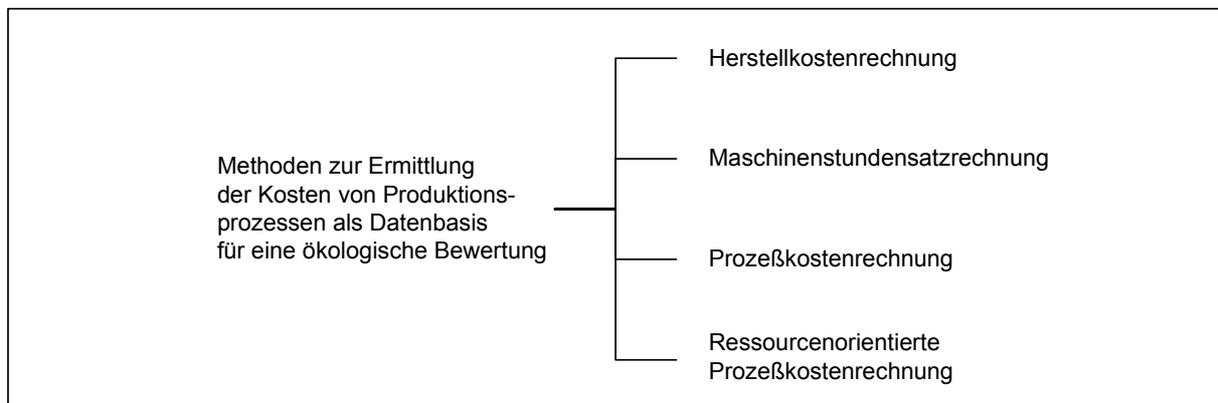


Abb. 7: Übersicht eingeführter Methoden zur Ermittlung der Kosten von Produktionsprozessen (Auswahl)

Das Beispiel der Herstellkostenrechnung verdeutlicht die Defizite klassischer Vollkostenrechnungen im Hinblick auf die vorliegende Bewertungsaufgabe. Denn in der Regel erfolgt die Verrechnung der sogenannten Fertigungsgemeinkosten, die einzelnen Prozessen direkt zurechenbar wären (wie zum Beispiel Abschreibungen für Maschinen oder Instandhaltungskosten), mittels einer sogenannten differenzierte Zuschlagskalkulation [Warnecke 1993b]. Da die Basis der Verrechnung – im wesentlichen die direkten Personalkosten - im Gegensatz zu den Gemeinkosten stetig kleiner geworden ist, betragen die Zuschläge mittlerweile oftmals mehrere hundert Prozent und das Verursachungsprinzip ist nicht mehr gewahrt. Zudem wird häufig nicht zwischen fixen oder variablen Kosten differenziert, so daß wirtschaftliche Prozesse nicht von unwirtschaftlichen unterschieden werden können und sich Investitionen, die häufig gerade im Gemeinkostenbereich zu Einsparungen führen, aufgrund des kleinen Einzelkostenanteils kaum mehr begründen lassen [Schönheit 1997]. Auch wenn diese Form der Kostenrechnung in der Industrie nach wie vor weit verbreitet ist und am häufigsten zur Ermittlung der Herstellkosten (insbesondere von Produkten), eingesetzt wird, ist sie für Entscheidungsrechnungen nicht geeignet.

Die Mißachtung des Verursachungsprinzips bei einer lohnbezogenen Zuschlagsrechnung und die Erkenntnis, daß wichtige Entscheidungsrechnungen (z.B. bei Investitionen, Verfahrens- und Kostenvergleichen oder der Prozeßplanung) eine genauere Analyse der Gemeinkosten erfordern, haben zur Entwicklung der Maschinenstundensatzrechnung geführt. Bei dieser Form der Zuschlagsrechnung werden die verschiedenen Kostenarten als proportional zur Maschinennutzungszeit betrachtet. Eingesetzt wird der Maschinenstundensatz hauptsächlich zur Kalkulation von Produkten und als Steuerungsinstrument im Rahmen der Maschinenbelegungsplanung [Witt 1986; VDMA 1983; Reime 1971]. Beim Maschinenstundensatz handelt es sich um einen Planverrechnungssatz, der zur Vollkostendeckung aller mit

der Maschinennutzung verbundenen fixen und variablen Kosten führt, wenn die geplante Kapazität zu 100% genutzt wird. Bei einer Erweiterung des Maschinenstundensatzes um bedienungspersonalabhängige Kosten erhält man den sogenannten Kapazitätskostensatz [VDMA 1983].

Der Maschinenstundensatz sowie der Kapazitätskostensatz stellen einfache und umfassende Kenngrößen dar, um die mit einem Produktionsverfahren bzw. -prozeß verbundenen Kosten zu charakterisieren und vergleichbar zu machen. Vom Ansatz her folgen sie dem Verursachungsprinzip, in der Praxis werden jedoch die einzelnen Kostenelemente (z.B. Energie-, Hilfs- und Betriebsstoffkosten) häufig nicht explizit ermittelt, sondern lediglich in Form von pauschalen Zuschlagssätzen berücksichtigt (z.B. bezogen auf den Anschaffungspreis). Der Grund liegt darin, daß die betriebliche Kostenrechnung nicht in der Lage ist, die benötigten Informationen im erforderlichen Detaillierungsgrad zu liefern. Für einen Vergleich alternativer Prozesse ist der Maschinenstundensatz als alleinige Bewertungsgröße nicht ausreichend, da wichtige, durch die Technologie und den Prozeß beeinflusste, kostenrelevante Aspekte nicht berücksichtigt werden. Dies sind u.a. Produktivitätsunterschiede, d.h. die erforderliche Fertigungszeit pro Produkteinheit, unterschiedliche Ausschußquoten, erzielbare Qualität, technologiebedingte Auswirkungen auf Material- und Entsorgungskosten sowie Abweichungen der tatsächlichen von der geplanten Kapazitätsnutzung. Ein weiterer wesentlicher Kritikpunkt ist, daß alle Kostenarten lediglich bezüglich der Variable "Zeit" zwangsproportionalisiert werden. Aus diesen Gründen kann es bei Verwendung des Maschinenstundensatzes zu Fehlentscheidungen kommen, weil die tatsächliche Kostensituation nicht vollständig bzw. nicht korrekt wiedergegeben wird.

Die Erkenntnis, daß eine verursachungsgerechte Zurechnung von Gemeinkosten nicht über pauschale Schlüssel erfolgen sollte, hat zur Entwicklung der Prozeßkostenrechnung geführt, die der herkömmlichen Vollkostenrechnung überlegen ist [Heinen 1991]. Hintergrund der Prozeßkostenrechnung ist, daß die Produktherstellung im Unternehmen Prozesse anstößt, die zu Ressourcenverbräuchen und damit zu Kosten führen. Ziel der Prozeßbetrachtung ist die Ermittlung der Vollkosten pro einmaligen Prozeßvollzug. Eine wesentliche Rolle bei der Ermittlung dieser durchschnittlichen Prozeßkostensätze spielen die sogenannten Kostentreiber, die sowohl einen Bezug zum Werteverzehr, d.h. den Kosten, als auch zur Wertentstehung, d.h. den Produkten, haben und mit deren Hilfe die anfallenden Kosten auf die einzelnen Prozesse und Kostenträger verteilt werden [Scholl 1998; Heinen 1991]. Durch die Auflösung und verursachungsgerechte Zuordnung des Gemeinkostenblocks kann auf eine pauschalisierte Zuschlagsrechnung weitgehend verzichtet werden. Hauptanwendungsgebiet der Prozeßkostenrechnung sind die indirekten Bereiche im Unternehmen (z.B. Auftragsabwicklung). Eine Anwendung der Prozeßkostenrechnung zur Bewertung von Produktionsprozessen ist in der Betriebswirtschaftslehre bislang nicht bekannt. Allerdings finden sich erste Ansätze hierzu in den Ingenieurwissenschaften.

Der an der RWTH Aachen entwickelte Ansatz der Ressourcenorientierten Prozeßkostenrechnung (auch "Ressourcenverfahren" oder "Ressourcenorientierte Bewertung") ist eine Methode zur Bewertung von Geschäftsprozessen, zur Ermittlung von Prozeßkostensätzen und zur verursachungsgerechten Kalkulation von Produkten [Scholl 1998; Eversheim 1995; Eversheim 1994]. Im wesentlichen handelt

es sich dabei um eine Synthese aus Prozeßkostenrechnung und Grenzplankostenrechnung, da nur entscheidungsrelevante Einzelkosten in die Betrachtung einfließen und proportionalisiert werden [Hartmann 1993; Schuh 1989]. Unter der Annahme, daß kostenbestimmende technische Einflußgrößen (in der Regel technisch-organisatorische Produktparameter) existieren, mit deren Hilfe sich der Werteverzehr proportionalisieren läßt, beschreiben Verbrauchsfunktionen den technischen Zusammenhang zwischen diesen sogenannten Ressourcentreibern und dem Ressourcenverzehr. Kostenfunktionen repräsentieren wiederum den monetären Zusammenhang zwischen dem ermittelten Ressourcenverzehr und Kosten. Die Kosten für in Anspruch genommene Ressourcen ergeben sich somit aus der Summe der Verknüpfungen von Verbrauchsfunktionen mit entsprechenden Kostensätzen, z.B. Personal- oder Maschinenstundensätzen [Scholl 1998; Eversheim 1995].

Der Vorteil dieser Vorgehensweise gegenüber der Prozeßkostenrechnung liegt darin, daß die Kosten der Tätigkeit nicht einfach durch die Prozeßmenge geteilt werden, sondern differenziert in Abhängigkeit des Ressourcenverzehrs ermittelt werden. Unzulässige Proportionalisierungen, wie sie beispielsweise bei der Zuschlagskalkulation erfolgen, können auf diese Weise vermieden werden [Eversheim 1995]. Allerdings ist das Aufstellen der verschiedenen Verbrauchs- und Kostenfunktionen extrem aufwendig. Vorgeschlagen werden u.a. Delphi-Befragungen, Auswertungen von Arbeitsplänen, Bewegungsablaufanalysen (MTM) und Regressionsanalysen bekannter Produkte [Hartmann 1993]. Mit einer Beschränkung auf ausgewählte entscheidungsrelevante, relative Einzelkosten kann dieser Aufwand zwar reduziert werden, allerdings sind dann absolute Kostenaussagen aufgrund der unvollständigen Betrachtungsweise nicht mehr möglich [Schuh 1989].

Die Ausführungen zeigen, daß klassische, auf Vollkosten basierende Verfahren - mit Ausnahme der Prozeßkosten- und der Maschinenstundensatzrechnung - nicht in der Lage sind, zwischen für die Betrachtung relevanten und nicht relevanten Kosten zu unterscheiden. Zudem erfolgt eine Proportionalisierung der Kosten üblicherweise ausschließlich über den Beschäftigungsgrad. Teilkostenrechnungen haben demgegenüber den Vorteil einer Fokussierung auf entscheidungsrelevante Kosten, so daß nicht-entscheidungsrelevante Kosten zwar erfaßt werden (können), aber nicht unbedingt verrechnet werden müssen [Reinhart 1999]. Da sie eine differenziertere und verursachungsgerechte Wiedergabe der Kostensituation erlauben, sind sie grundsätzlich besser für Bewertungsaufgaben im Rahmen der taktischen Produktionsplanung geeignet. Abgesehen von den genannten Schwachstellen, stellt dabei die Ressourcenorientierte Prozeßkostenrechnung vom Prinzip her einen geeigneten Ansatz für eine verursachungsgerechte und detaillierte ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen dar, da sie die Ideen der Prozeßkostenrechnung weiterentwickelt und mit Elementen der Teilkostenrechnung verknüpft. Erforderlich ist jedoch eine Operationalisierung, v.a. hinsichtlich Aufwandsreduktion zur Ermittlung der Kosten(-funktionen), und die Entwicklung einer Bewertungslogik zur Aufbereitung der Ergebnisse zu einer Entscheidungsgrundlage. In Tab. 6 sind die wichtigsten charakteristischen Merkmale der beschriebenen Methoden noch einmal zusammengefaßt.

<b>Methode</b>	<b>Untersuchungsobjekt</b>	<b>Erfassungsumfang</b>	<b>Verursachungsprinzip</b>	<b>Analyse der Gemeinkosten</b>	<b>Art der Proportionalisierung</b>
Herstellkostenrechnung (differenzierte Zuschlagskalkulation)	Produkt	Vollkosten	nein	nein	feste Zuschlässe bezogen auf Kostenarten
Maschinenstundensatzrechnung	Prozeß	Vollkosten	prinzipiell ja, häufig jedoch Zuschläge	ja	Nutzungsdauer (Zeit)
Prozeßkostenrechnung	indirekte Prozesse	Vollkosten	ja	ja	einmalige Inanspruchnahme des Prozesses
Ressourcenorientierte Prozeßkostenrechnung	Prozeß, Produkt	Teilkosten	ja	ja	Verbrauchs- und Kostenfunktionen

Tab. 6: Charakterisierung eingeführter Methoden zur Ermittlung der Kosten von Produktionsprozessen

### 3.2.2 Methoden zur Bewertung der Kosten von Produktionsprozessen

Die Kosten eines Prozesses sind für sich alleine genommen noch nicht aussagekräftig, sondern erfordern immer eine von der jeweiligen Situation abhängige Bewertung, um eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit eines Prozesses treffen zu können. Bei der Bewertung von Produktionsprozessen wird häufig von "wirtschaftlichen Prozessen" als übergeordnetem Ziel gesprochen. Wirtschaftlichkeit ist jedoch keine absolute, prozeß- oder technologieimmanente Eigenschaft, sondern immer relativ. Die Bewertung der Kosten von Produktionsprozessen erfordert somit einen Vergleich, wobei dies eine Gegenüberstellung alternativer Zustände (z.B. von Prozeßalternativen), oder ein Abgleich mit einem Ziel sein kann (z.B. den zulässigen Herstellkosten oder einem am Markt erzielbaren Preis). Eine ökonomische Bewertung im Sinne dieser Arbeit wird im allgemeinen als Wirtschaftlichkeitsrechnung bezeichnet und durch Methoden der Investitionsrechnung unterstützt (Abb. 8) [Warnecke 1996; Heinen 1991].

Die Methoden der statischen Wirtschaftlichkeitsrechnung, wie z.B. Kostenvergleich und Amortisationsrechnung, berücksichtigen Kosten und Erlöse einer Durchschnittsperiode und sind aufgrund ihrer einfachen Handhabung in der Praxis sehr beliebt [Warnecke 1996, Heinen 1991]. Häufig werden sie auch dann eingesetzt, wenn unsichere Ausgangsdaten vorliegen oder Überschlagsrechnungen ausreichen. Für langfristig in die Zukunft schauende strategische und taktische Planungsrechnungen bieten sie eine ausreichende Genauigkeit und sind gut geeignet.

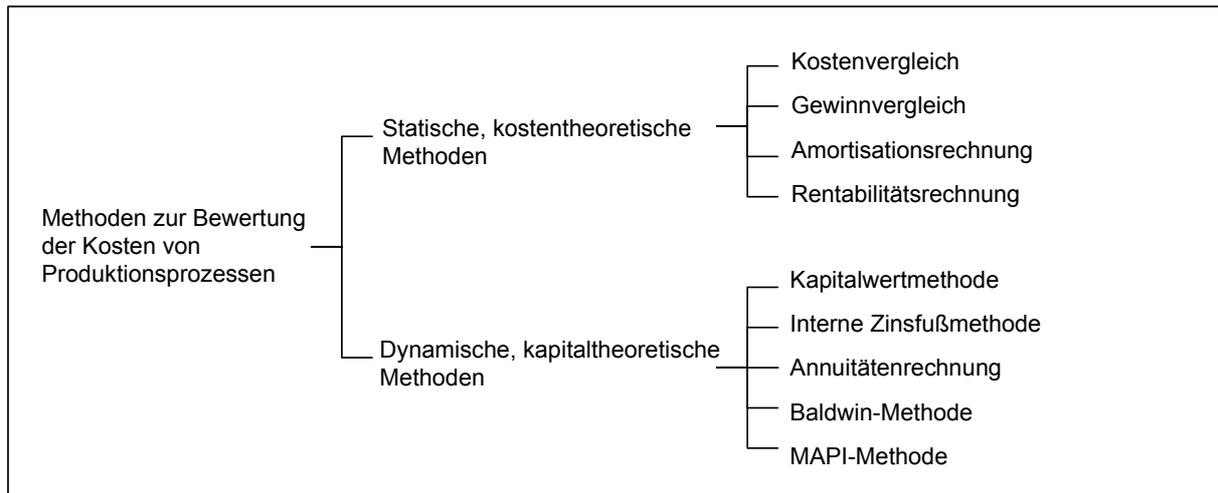


Abb. 8: Übersicht eingeführter Methoden zur Bewertung der Kosten von Produktionsprozessen (Auswahl)

Die einfachste Form einer Wirtschaftlichkeitsrechnung ist der Kostenvergleich auf Basis repräsentativer Produkte bzw. Produktgruppen, bei dem die Alternative mit den niedrigsten Kosten gewählt wird [Heinen 1991; Reime 1971]. Voraussetzung für den Vergleich von Kosten pro Periode oder pro Zeiteinheit (z.B. Maschinenstundensatz) ist eine gleiche Ausbringung, ansonsten sind die Kosten pro erstellter Leistungseinheit zu vergleichen [Warnecke 1996]. Mit Hilfe der sogenannte "Ingenieurformel" können zudem neben laufenden Kosten auch einmalige, auf die Laufzeit verteilte (Anschaffungs-)Kosten, mögliche Restwerte und die durchschnittliche Kapitalbindung berücksichtigt werden [Heinen 1991; Reime 1971]. Eine erhebliche Reduktion des Aufwands kann erzielt werden, wenn bei der Bewertung von Varianten anstelle von Absolutkosten lediglich der Kostenunterschied im Vergleich zu bekannten Kosten, d.h. Differenz- oder Grenzkosten, betrachtet wird [VDI 2235, 1987]. Alle Kosten, die bei den betrachteten Alternativen gleichermaßen anfallen, sind dagegen irrelevant und es erfolgt eine Konzentration allein auf entscheidungsbestimmende Kosten [Reinhart 1999].

Die Methode des Kostenvergleichs ist nicht in der Lage, einen absoluten Maßstab für eine ökonomische Beurteilung zu liefern, sondern kann nur eine Aussage über die relative Vorteilhaftigkeit von Alternativen machen [Warnecke 1996]. Insbesondere bei einer Partialrechnung mit Differenzkosten ist eine Bewertung des Kostenunterschieds sehr schwer, da die Gesamtkosten als Vergleichsmaßstab fehlen. Für eine Bewertung im Sinne dieser Arbeit ist diese Variante somit weniger geeignet.

Eine einfache und häufig eingesetzte Methode für die Bewertung von Investitionen ist die Amortisationsrechnung, mit deren Hilfe die Wiedergewinnungszeit des Kapitaleinsatzes ermittelt wird. Für Neu- und Erweiterungsinvestitionen bietet sich dabei die Cash-flow-Methode an, während die Kostenersparismethode hauptsächlich für Ersatzinvestitionen Anwendung findet [Heinen 1991]. Ein Kriterium zur Gewinn- bzw. Rentabilitätsbeurteilung stellt allerdings keine dieser beiden Methoden dar, da die tatsächliche Nutzungsdauer unberücksichtigt bleibt.

Weniger relevant für eine ökonomische Bewertung im Rahmen der Produktionsplanung sind die Methoden der Gewinnvergleichs- oder Rentabilitätsvergleichsrechnung, da in der Regel unterstellt werden kann, daß die Produkterlöse nicht von der Ausgestaltung des Herstellprozesses beeinflußt werden, und somit die Kosten den ausschlaggebenden Parameter bei der Entscheidungsfindung darstellen.

Im Gegensatz zu den statischen Verfahren wird bei den dynamischen Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung der gesamte Zeitraum von der Investition bis zur Deinvestition berücksichtigt und mit Einzahlungs- und Auszahlungsreihen anstelle von durchschnittlichen Kosten und Erlösen gerechnet. Dem liegt die Haltung zugrunde, daß nicht nur die absolute Höhe, sondern auch die Zeitpunkte der Zahlungsströme relevant sind, und spätere Einnahmen einen geringeren Wert haben als eine Zahlung in gleicher Höhe zu einem früheren Zeitpunkt. Voraussetzung ist allerdings ein vollkommener Kapitalmarkt, bei dem sich frei werdende Mittel mit einem entsprechenden Zinssatz verzinsen lassen [Warnecke 1996; Heinen 1991].

Bei der Kapitalwertmethode werden die erwarteten Einnahmen und Ausgaben mit Hilfe eines Kalkulationszinsfußes auf einen Bezugszeitpunkt, meist den Beginn einer Investition, abgezinst. Dieser sogenannte Bar- oder Kapitalwert stellt den Gegenwartswert des gesamten Überschusses der Investition dar, der über die Amortisation des Kapitaleinsatzes und die kalkulatorischen Zinsen hinaus zurückfließt. Die Umkehrung dieser Rechnung ist die interne Zinsfußmethode, bei der derjenige Zinsfuß ermittelt wird, für den der Barwert der Investition gleich Null wird. Dies entspricht der Rentabilität der Investition über ihrer Nutzungszeit. Die dynamische Amortisationsrechnung ist der statischen Variante weitgehend vergleichbar, abgesehen davon, daß die Bestimmung der Amortisationsdauer im Rahmen einer Zinseszinsrechnung unter Berücksichtigung eines kalkulatorischen Zinssatzes erfolgt. Weitere, eher theoretische Methoden sind die Annuitätenrechnung, Baldwin- und MAPI-Methode [Warnecke 1996; Heinen 1991].

Mit Ausnahme von einigen Investitionsentscheidungen spielen die dynamischen Methoden der Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Praxis, insbesondere in der Produktionsplanung, eine eher untergeordnete Rolle. Die mehrperiodige Betrachtungsweise erlaubt zwar die Berücksichtigung von Veränderungen bei Kosten und Erlösen (z.B. Anlaufprobleme), jedoch ist die Ermittlung der in der Zukunft liegenden Zahlungsströme mit größeren Unsicherheiten verbunden und v.a. die Wahl des "richtigen" Kalkulationszinsfußes ist subjektiv und nicht unumstritten. Hinzu kommt, daß die Ergebnisse nicht immer eindeutig sind, da die verschiedenen Verfahren zu unterschiedlichen Rangfolgen der bewerteten Alternativen führen können [Warnecke 1996; Heinen 1991].

Zusammenfassend sind die statischen Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung am besten für die Bewertung der Kosten von Produktionsprozessen geeignet, wobei eine Beschränkung auf eine reine Kostenbetrachtung aus den oben genannten Gründen ausreichend ist. Da der Fokus des betrieblichen Rechnungswesens jedoch auf der Abbildung einer bestehenden Gesamtkostensituation liegt, bestehen allerdings gewisse Defizite hinsichtlich einer verursachungsgerechten und prozeßorientierten Ermittlung und Verrechnung der Kosten.

### 3.2.3 Methoden zur ökonomischen Bewertung umweltrelevanter Aspekte

In der Gruppe der Methoden zur ökonomischen Bewertung umweltrelevanter Aspekte sind Ansätze zusammengefaßt, die weniger der klassischen Betriebswirtschaftslehre entstammen, sondern deren Ursprung eher im Umweltmanagement zu sehen ist. Gemäß der Darstellung in Abb. 9 lassen sie sich in zwei Hauptgruppen einteilen.

Bei Ansätzen zur monetären Bewertung von Ökobilanzergebnissen werden die Auswirkungen des untersuchten Prozesses auf die Umwelt nicht in naturwissenschaftlichen Größen angegeben, sondern in Geldeinheiten quantifiziert [DIN 33926, 1996]. Für eine Monetarisierung und Internalisierung externer Effekte (Schadenskosten-Ansatz) liegen jedoch weder ausreichende Kenntnisse über die tatsächlich entstehenden Schäden vor, noch existieren konsensfähige Methoden zur Bemessung entsprechender Preise. Hinzu kommt, daß externe Kosten betriebswirtschaftlich nicht relevant sind, solange sie nicht tatsächlich internalisiert werden. Dementsprechend gering ist die Bereitschaft des Finanzcontrolling zur Anerkennung dieser Größe als entscheidungsrelevante Kosten. Beim Vermeidungskostenansatz besteht dagegen das Problem, daß die ermittelten Kosten nicht von den verursachten Auswirkungen auf die Umwelt, sondern von unternehmens- und prozeßbezogenen Randbedingungen abhängen. Aufgrund des fehlenden kausalen Zusammenhangs zwischen der Höhe der Kosten und der Bedeutung der Umweltwirkungen verlieren Vermeidungskosten jedoch ihre Steuerungswirkung, so daß sie ebenfalls nicht als Bewertungsgröße geeignet sind. In der Konsequenz ist mittlerweile eine weitgehende Abkehr von der Idee einer Monetarisierung von Ökobilanzergebnissen festzustellen [Spengler 1998; Behnsen, 1996].

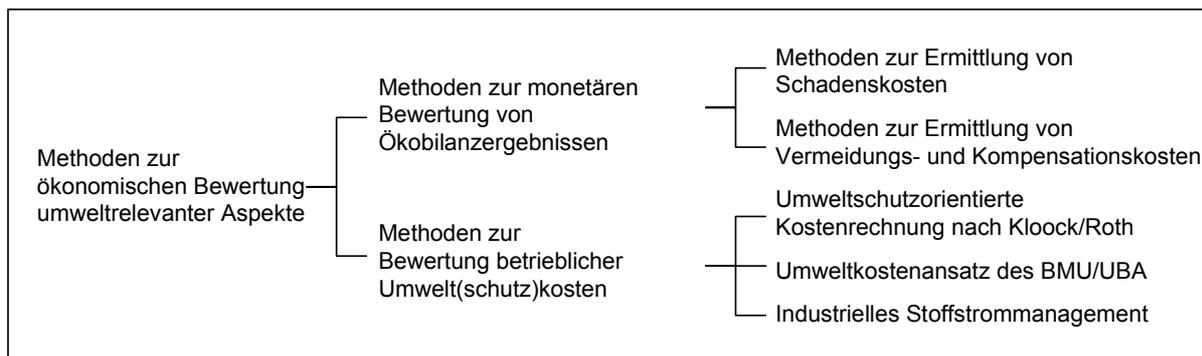


Abb. 9: Übersicht eingeführter Methoden zur ökonomischen Bewertung umweltrelevanter Aspekte (Auswahl)

Die zweite Gruppe betriebswirtschaftlich orientierter Methoden des Umweltmanagements beschränkt sich daher auf die Ermittlung betrieblich internalisierter Umwelt(schutz)kosten in einer separaten Kostenarten-, Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung [Holze 2001; Rogler 2000]. Der Grund für ihre Entstehung liegt im Unvermögen des konventionellen betrieblichen Rechnungswesens und des darauf

aufbauenden Controllings, umweltrelevante Kosten transparent, vollständig und verursachungsgerecht erfassen bzw. verrechnen zu können. Vielmehr werden umweltrelevante Ausgaben, wie beispielsweise Energiekosten, Abwasser- und Abfallentsorgungsgebühren sowie Kosten für End-of-pipe-Maßnahmen, in der Regel undifferenziert als Gemeinkosten verbucht. In der Konsequenz besteht keine Motivation zur Kostensenkung und umweltverträglichere Anlagen und Produkte werden ungerechterweise zugunsten umweltbelastender Aktivitäten mit zu hohen Kosten belegt [Spengler 1998; BUM/UBA 1995].

In den frühen Ansätzen einer Umweltkostenrechnung, wie beispielsweise dem von Kloock und Roth, werden Umweltkosten als diejenigen Ausgaben definiert, die dem Unternehmen zusätzlich zu den Produktionskosten durch die Erfüllung von Umweltauflagen entstehen [BUM/UBA 1995]. Insbesondere bei integrierten Umweltschutzmaßnahmen führt diese Definition jedoch schnell zu Abgrenzungsproblemen zwischen umwelt- und prozeßinduzierten Kosten [Lange 1998; Behnsen 1996]. Der entscheidende Kritikpunkt ist jedoch, daß eine umweltorientierte Unternehmensführung primär als zusätzliche Kostenbelastung aufgefaßt wird [Spengler 1998]. Dies führt dazu, daß eine eindeutige Zielgröße fehlt, an der sich eine Optimierung oder eine Bewertung orientieren könnte.

Neuere Ansätze, wie der von Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt, Spengler oder IPA und Wuppertal Institut sind dagegen wesentlich entscheidungsorientierter und zielen auf eine Kostenminimierung durch aktives Stoffstrommanagement [Jürgens 2000]. Uneingeschränkt positiv zu werten ist die Abkehr von pauschalisierten Zuschlagssätzen und eine Detaillierung der bestehenden Kostenrechnung, insbesondere des Gemeinkostenblocks [BUM/UBA 1995]. Das entscheidende Defizit bei diesen Methoden ist jedoch, daß ausschließlich ökonomische Kriterien relevant sind [Barankay 2000; Behnsen, 1996], so daß eine Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt nicht möglich ist.

Methoden	Bewertungsgrundlage (Anz. Kategorien)	Bewertungslogik	Gewichtung	Skala	Ergebnisstruktur/Aggregation
EPS-Modell	Sachbilanz	SN	LG	Kardinal	1 Kennzahl: monetäre Größe (Schadenskosten)
Tellus-Methode	Sachbilanz	SN	LG	Kardinal	1 Kennzahl: monetäre Größe (Vermeidungs- u. Kompensationskosten)
Umweltschutzorientierte Kostenrechnung	Kostenrechnung	SN	LG	Kardinal	1 Kennzahl: monetäre Größe (Kosten des betriebl. Umweltschutzes)
Umweltkostenansatz des BMU/UBA	Sachbilanz und Kostenrechnung	SN	LG	Kardinal	1 Kennzahl: monetäre Größe (Reststoffkosten)
Industrielles Stoffstrommanagement	Sachbilanz und Prozeßkostenrechnung	SN	LG	Kardinal	1 Kennzahl: monetäre Größe (stoffflußbasierte Kreislaufwirtschaftskosten)
<i>Bewertungslogik:</i> SN Schaden-Nutzen-Ansatz		<i>Art und Ableitung der Gewichtung:</i> LG Leitgröße			

Tab. 7: Charakterisierung eingeführter Methoden zur monetären Bewertung umweltrelevanter Aspekte

### 3.3 Methoden zur ökologischen und ökonomischen Bewertung

Im Gegensatz zu den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Methoden zeichnen sich die in dieser Gruppe zusammengefaßten Methoden (Abb. 10) dadurch aus, daß mit ihnen sowohl eine Bewertung nach ökologischen, als auch nach betriebswirtschaftlichen Kriterien möglich ist. Eine weitere Gemeinsamkeit ist, daß ökologische und ökonomische Teilbewertungen zunächst mit eigenen Bewertungslogiken durchgeführt werden, bevor gegebenenfalls eine Gesamtaussage abgeleitet wird.

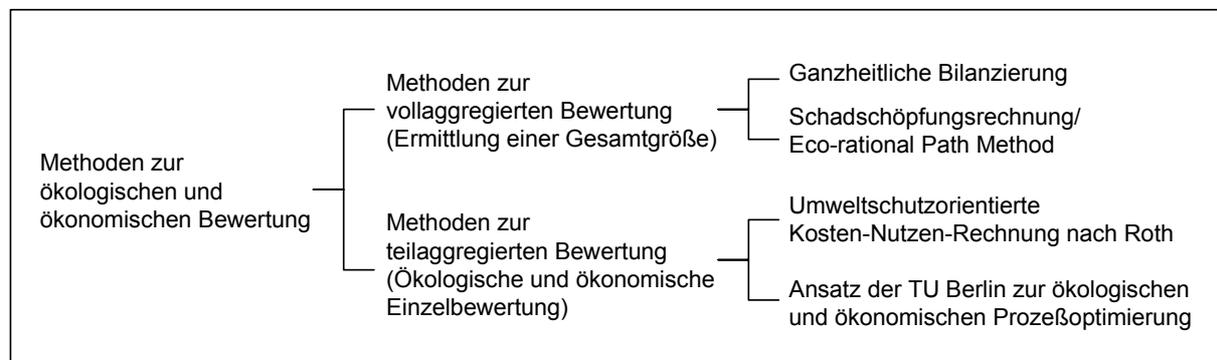


Abb. 10: Übersicht eingeführter Methoden zur ökologischen und ökonomischen Bewertung (Auswahl)

Bei der an der Universität Stuttgart entwickelten Ganzheitliche Bilanzierung erfolgt die Aggregation über eine objektiv nicht begründbare und im Ergebnis nur schwer nachvollziehbare Vermischung der vom Charakter her unterschiedlichen ökologischen und ökonomischen Bewertungsergebnisse zu einem Gesamtnutzwert. Neben den allgemeinen Defiziten einer derart angewandten Nutzwertanalyse [Zangemeister 1976] sind insbesondere methodische Schwachpunkte bei der Ermittlung der Umweltwirkungen und die fehlende Konkretisierung der ökonomischen Komponente der Bewertung zu kritisieren. Hinzu kommt, daß die Methode in erster Linie für Anwendungen im Rahmen der Produktentwicklung konzipiert wurde. Die Ganzheitliche Bilanzierung ist daher für eine Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien im Rahmen der taktischen Produktionsplanung allenfalls bedingt geeignet.

Die von Schaltegger/Sturm vorgestellte Methode der Schadschöpfungsrechnung zeichnet sich in erster Linie dadurch aus, daß die beiden ökologischen und ökonomischen Kennzahlen getrennt und unabhängig voneinander ermittelt werden, bevor sie zu einer Top-Kennzahl "Schadschöpfungseinheiten pro Deckungsbeitrag" verknüpft werden. Im Gegensatz zur Ganzheitlichen Bilanzierung wird darauf verzichtet, die beiden unterschiedlichen Kategorien in einer Dimension auszudrücken. Auf diese Weise bleibt das Zustandekommen des Bewertungsergebnisses transparent und nachvollziehbar und die Ergebnisgröße läßt sich besser interpretieren. Allerdings ist zu bedenken, daß den Teilbewertungen mit dem betrieblichen Rechnungswesen und Ökobilanzen unterschiedliche Datenbasen zugrunde liegen. Nicht akzeptabel ist dagegen die Art der Ermittlung der Umweltwirkungen, da von der allgemeinen Vorgehensweise nach DIN EN ISO 14042 in wesentlichen Punkten abgewichen wird. Ebenso ist die Kenngröße "Deckungsbeitrag" für eine ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien nicht geeignet.

Roth verknüpft in ihrer Dissertation die bereits in Kap. 3.2.3 vorgestellte Umweltkostenrechnung mit der Methode der ökologischen Buchhaltung von Müller-Wenk zu einer umweltschutzorientierten Kosten-Nutzen-Rechnung [Roth 1992]. Aufgrund der Defizite der Teilbewertungen ist auch deren Kombination als nicht geeignet abzulehnen.

Die im Rahmen des BMBF-Projekts "Stoffkreislaufschließung bei abtragenden Verfahren in Prozeßblöcken" an der TU Berlin entwickelte Methode wurde für die ökologische und ökonomische Beurteilung und Optimierung von abtragenden, galvanischen Prozessen konzipiert [Ackermann 1999; Fleischer 1999]. Als prozeßorientierte Vorgehensweise kommt sie einer Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien im Sinne dieser Arbeit bislang am nächsten, jedoch ist die Methode als operativer Ansatz ausschließlich auf die Optimierung bestehender Prozesse begrenzt. Aufgrund einer partiellen Differentialbetrachtung, bei der Verfahrensalternativen in Relation zu einem Ist-Zustand bewertet werden, sind dabei methodisch bedingt weder absolute, noch allgemeingültige Aussagen möglich. Für den Fall, daß eine Alternative nicht in allen Wirkungskategorien überlegen ist (was in der Praxis eher die Regel als die Ausnahme ist), wird eine verbal-argumentative Vorgehensweise vorgeschlagen.

Ein weiteres, wesentliches Defizit der angewandte Bewertungslogik ist, daß eine Verknüpfung der beiden Teilergebnisse der Bewertung zu einer Gesamtaussage nicht thematisiert wird.

Tab. 8 faßt wesentliche charakteristische Eigenschaften der beschriebenen Methoden noch einmal zusammen. Insgesamt stellt die Grundidee, den ökologischen Teil der Bewertung mit Hilfe einer Ökobilanz in Anlehnung an DIN EN ISO 14040ff abzudecken und für die ökonomische Bewertung Methoden der Kosten- und Investitionsrechnung einzusetzen, den bislang besten Ansatz für eine Verknüpfung von ökologischer und ökonomischer Bewertung dar.

Methoden		Bewertungsgrundlage (Anz. Kategorien)	Bewertungslogik	Gewichtung	Skala	Ergebnisstruktur/ Aggregation
Ganzheitliche Bilanzierung (IKP)	U	Wirkungsabschätzung (14 Kat.)	NWA	Norm, Präf	Ordinal	1 Kennzahl: Gesamtnutzwert
	K	nicht definiert				
Schadschöpfungsrechnung (EPM)	U	Sachbilanz (nur Input)	KG	Ziele	Kardinal	1 Kennzahl: Schadschöpfungseinheiten pro Deckungsbeitrag
	K	Deckungsbeitragsrechnung	SN	LG	Kardinal	
Umweltschutzorientierte Kosten-Nutzen-Rechnung	U	Sachbilanz	KG	Ziele	Kardinal	2 Kennzahlen: Umweltbelastungspunkte, betriebliche Umweltkosten
	K	Kostenrechnung	SN	LG	Kardinal	
Ansatz der TU Berlin zur Prozeßoptimierung	U	Wirkungsabschätzung (9 Kat.)	v-a	Norm	Ordinal	ökologisch: verbal-argumentativ ökonomisch: Kostenvergleich, Amortisationszeit
	K	Kosten- und Investitionsrechnung	SN	LG	Kardinal	
<i>Komponenten der Bewertung:</i> U ökologische Komponente K ökonomische Komponente  <i>Bewertungslogik:</i> v-a verbal-argumentativer Ansatz NWA nutzwertanalytischer Ansatz SN Schaden-Nutzen-Ansatz KG Ansatz der kritischen Größe			<i>Art und Ableitung der Gewichtung:</i> LG Leitgröße Norm Normalisierung Ziele Umweltstandards und -ziele, rechtlicher Rahmen, Politik, Ziele des Bewertenden Präf Präferenzen des Bewertenden oder mit Hilfe sozialwissenschaftlicher Methoden (z.B. Befragungen) ermittelt			

Tab. 8: Charakterisierung eingeführter Methoden zur ökologischen und ökonomischen Bewertung

### 3.4 Schlußfolgerungen für eine Weiterentwicklung bestehender Methoden

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen ein Defizit an Ansätzen und Methoden, die eine zufriedenstellende Bewertung von Produktionsprozessen zugleich nach ökologischen und ökonomischen Kriterien erlauben würden [Müller-Christ 2001]. Allerdings besteht eine Reihe teilweise guter Ansätze für eine ökologische oder bzw. ökonomische Einzelbewertung. Ein weiterer allgemeiner und wesentlicher Schwachpunkt besteht darin, daß Bewertungsgrößen und -logik bei der Mehrzahl der Methoden

nicht auf die Bewertung von Prozessen zugeschnitten sind und damit nicht für eine Beurteilung von Planungsalternativen im Rahmen einer taktischen Produktionsplanung geeignet sind. Die Beurteilung von (neuen) Produktionstechnologien wird so gut wie überhaupt nicht thematisiert.

Der Kritikpunkt einer mangelnden Prozeßorientierung trifft insbesondere auf die überwiegende Mehrheit der Methoden zur ökologischen Bewertung zu, die primär auf die Bewertung von Produkten zugeschnitten sind. Eine gewisse Ausnahme bilden zwar die für eine Optimierung bestehender Prozesse konzipierten Ansätze, jedoch dienen diese vorrangig einer Unterstützung kurzfristiger Entscheidungen und sind für Aufgaben im Rahmen einer taktischen Produktionsplanung nur wenig geeignet.

Zur Ermittlung der Grundlage für eine ökologische Bewertung stellt die Produkt-Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040ff jedoch einen systematischen und allgemein akzeptierten Ansatz dar, der bei einer entsprechenden Modifikation auch auf die Bewertung von Prozessen und Technologien anwendbar ist. Insbesondere eignet er sich zur Ermittlung einer Datenbasis in Form einer Sachbilanz und zur Abschätzung von Umweltwirkungen. Die Methode von Stahl [Stahl 1999] stellt eine gute Ergänzung zur Verdichtung dieser Daten zu einer ökologieorientierten Bewertungsaussage dar, zumal die zum Einsatz kommende Bewertungslogik mit den in der Norm der Ökobilanz gesetzten Rahmenbedingungen konform ist. Im Vergleich zu diesen beiden Methoden sind die übrigen Konzepte für eine ökologische Bewertung entweder nicht umfassend genug oder aufgrund entscheidender Schwachstellen in der Bewertungslogik abzulehnen (s. auch Ausführungen in Kap. 3.1.2).

Für eine ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien ist eine Plankostenrechnung auf Teilkostenbasis vom Ansatz her am besten zur Ermittlung einer Datengrundlage geeignet, da sie eine verursachungsgerechte Detaillierung des zukünftig zu erwartenden Gemein- und Fixkostenblocks gestattet. Allerdings sind die klassischen Kostenrechnungssysteme, insbesondere die der Kostenartenrechnung, im Bereich der Teilkostenrechnung eher schwach ausgeprägt. Hinzu kommt, daß sich die Methoden nur bedingt zur Ermittlung der mit Prozessen verbundenen Kosten eignen, da sie überwiegend für die Produktkalkulation und Preisfindung konzipiert wurden. Wünschenswert wäre dagegen eine Anlagenkostenrechnung, mit deren Hilfe die Kosten für die Bereitstellung, Bereithaltung, Einsatz, Ersatz und Ausmusterung von Betriebsmitteln geplant, dokumentiert und kontrolliert werden können [Männel 1991].

Einen ersten Schritt in diese Richtung stellt die Aufspaltung und verursachungsgerechte Zuordnung des Gemeinkostenblocks bei der Prozeßkostenrechnung dar. Mit der Ressourcenorientierten Prozeßkostenrechnung wird eine speziell auf wertschöpfende Prozesse zugeschnittene Methode zur detaillierten und umfassenden Kostenermittlung angeboten. Da unterschiedliche Produktionskonzepte nur auf Prozeßebene und mit einem Detaillierungsgrad, der höher als in der traditionellen Kostenrechnung ist, sinnvoll bewertet werden können, erscheint das Konzept der Ressourcenorientierten Prozeßkostenrechnung als der bislang beste Ansatz zur Ermittlung einer Datengrundlage für eine ökonomische Bewertung. Die Ermittlung detaillierter Verbrauchs- und Kostenfunktionen für Bewertungszwecke ver-

meidet zwar den Nachteil der Maschinenstundensatzrechnung, Kosten allein über die Variable "Zeit" zu proportionalisieren, ist allerdings viel zu aufwendig und daher unrealistisch.

Zur Bewertung der ermittelten Kosten empfiehlt sich eine Orientierung an den statischen Verfahren der Wirtschaftlichkeitsrechnung, zumal eine zukunftsorientierte Planung und Bewertung von Produktionsprozessen in der Regel auf Durchschnittswerten basiert. In diesem Zusammenhang erscheint auch eine Begrenzung auf eine reine Kostenbetrachtung vertretbar, da im allgemeinen nur Kostenziele vorgegeben sind und es nicht üblich ist, Erlöse aus dem Verkauf von Produkten auf die zu ihrer Herstellung benötigten Prozesse aufzuteilen. Vor diesem Hintergrund empfiehlt sich eine statische Kostenvergleichsrechnung, wohingegen eine dynamische Rechnung nur dann erforderlich ist, wenn Alternativen mit stark unterschiedlichem Kostenanfall hinsichtlich Zeitpunkt und Höhe zu vergleichen sind.

Bei den derzeit bekannten Ansätzen zur Verknüpfung von ökologischen und ökonomischen Kriterien handelt es sich bei genauerer Betrachtung weitgehend um unabhängig voneinander durchgeführte Einzelbewertungen. Allen beschriebenen Methoden gemeinsam ist daher das Defizit zweier unabhängig voneinander ermittelter und nicht aufeinander abgestimmter Datenbasen zur Bewertung der genannten Teilaspekte. In der Konsequenz können weder Zusammenhänge zwischen den ökologischen und ökonomischen Größen, noch für das Gesamtergebnis wichtige Einflußfaktoren aufgezeigt werden. Ein weiterer Nachteil der getrennten Datengrundlagen ist, daß diese in der Regel nicht konsistent sind bzw. Änderungen in einem Teilbereich aufgrund der Komplexität der Thematik kaum oder nur mit großem Aufwand nachgezogen werden können. Zusammen mit ihrer unzureichenden Eignung zur Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien sind diese Methoden daher nicht für eine umfassende integrierte ökologische und ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien im Sinne der Aufgabenstellung dieser Arbeit geeignet.

Zusammenfassend ergeben sich aus der Untersuchung der bekannten Methoden folgende Entwicklungsschwerpunkte: Zum einen sind eine stärkere Prozeßorientierung und Operationalisierung für die Aufgaben einer taktischen Produktionsplanung erforderlich, die eine verursachungsgerechte Ermittlung aller zurechenbaren Umweltwirkungen und Kosten des untersuchten Prozesses gestatten. Zum anderen sind Datenermittlung, -verrechnung und -bewertung der ökologischen und ökonomischen Betrachtung enger als bislang üblich aufeinander abzustimmen, um den Arbeitsaufwand zu reduzieren und die Zusammenhänge und Einflußfaktoren zwischen Umweltwirkungen und Kosten aufzeigen zu können. In Tab. 9 sind wichtige charakteristische Merkmale derjenigen zuvor diskutierten Methoden zusammengefaßt, die für Einzelaspekte geeignete Ansatzpunkte zur Entwicklung einer Methode für eine integrierte ökologische und ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien bieten.

	Produkt- ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff	Methode nach Stahl	Teilkosten- rechnung	Ressourcen orientierte Prozeß- kosten- rechnung	Kosten- vergleichs- rechnung
<b>Anwendungsgebiet</b>					
Entwicklung neuer Produktions- technologien					
Bewertung neuer Produktions- technologien					(X)
Planung v. Produktionsprozessen/ Investitionsentscheidungen	(X)	(X)		(X)	X
Optimierung bestehender Prozesse	X	X	X	X	X
<b>Konzeption</b>					
Prozeßorientierung	(X)	(X)		X	(X)
Quantifizierung der Umweltwirkungen	X	X			
Bewertung der Umweltwirkungen	(X)	X			
Quantifizierung der Kosten			X	X	X
Bewertung der Kosten					X
Verursachungsgerechte Datenermittlung	(X)	(X)	X	X	(X)
<b>Integration</b>					
Integration von ökologischer und ökonomischer Bewertung					
Aufzeigen von Zusammenhängen zw. Kosten und Umweltwirkungen					
Aufzeigen von Einflußfaktoren auf Kosten bzw. Umweltwirkungen	(X)	(X)		X	
<b>Bewertungslogik</b>					
Transparenz und Nachvollziehbarkeit	X	X	X	X	X
Verdichtung der Ergebnisse	(X)	X	X		X
Entscheidungsunterstützung	(X)	X		(X)	X
X	Anforderung im wesentlichen erfüllt				
(X)	Anforderung ansatzweise erfüllt / Methode prinzipiell geeignet (Modifikation bzw. Weiterentwicklung erforderlich)				
	Wesentliche Defizite bestehender Methoden hinsichtlich einer integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien				

Tab. 9: Ansatzpunkte und Schwerpunkte für die Entwicklung einer Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien

## 4 Zielsetzung

Die größten Potentiale für ein an ökologischen und ökonomischen Zielen gleichermaßen orientiertes Produktionsmanagement liegen in der Gestaltung a priori optimaler Prozessen im Rahmen der taktischen Produktionsplanung (s. Kap. 2.1). Hierzu sind umweltrelevante und betriebswirtschaftliche Aspekte im Sinne eines proaktiven Chancen-Managements möglichst frühzeitig in Planungs- und Entscheidungsprozesse einzubeziehen. Von besonderer Relevanz sind in diesem Zusammenhang Entscheidungen über den möglichen Einsatz neuer Technologien sowie Investitionen in Maschinen und Anlagen, da hierdurch Niveau und Struktur der Umweltauswirkungen und Kosten einer Produktion langfristig festgelegt werden [Jürgens 1999; Kühnle 1995b]. Die Ausführungen zum Stand der Methodenentwicklung zeigen jedoch ein deutliches Defizit an Methoden zur Unterstützung der genannten Aufgaben.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine Methode für eine integrierte ökologische und ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien im Rahmen der taktischen Produktionsplanung zu entwickeln. Die Aufgabe besteht darin, die Trennung zwischen den bislang voneinander entkoppelten Einzelbewertungen aufzuheben. Dies kann durch eine konsequente Kombination und Weiterentwicklung bekannter Ansätze erreicht werden sowie die Konzeption und Ausgestaltung einer umfassenden Bewertungslogik unter Verwendung einer gemeinsamen, in sich konsistenten Datenbasis.

Neben der Ausrichtung auf Produktionsprozesse und -technologien stellt die Unterstützung von Aufgaben der taktischen Produktionsplanung eine wesentliche Neuerung gegenüber bislang bekannten Methoden dar. Der Schwerpunkt ist auf der Bewertung von Planungsalternativen zur Erfüllung einer konkreten Produktionsaufgabe zu legen, d.h. auf die Ermittlung einer umfassenden Entscheidungsgrundlage durch Gegenüberstellen und Verdichtung der jeweiligen ökologischen und ökonomischen Vor- und Nachteile der zur Auswahl stehenden Prozesse und Technologien. Darüber hinaus soll die Methode eine Identifikation derjenigen Einflußgrößen unterstützen, die das Bewertungsergebnis maßgeblich bestimmen, um bereits während der Planungsphase eine aktive Beeinflussung und ganzheitliche Optimierung der Ergebnisse zu ermöglichen. Die Methode ist für die Hauptanwendungsgebiete Technologie-, Investitions- und Prozeßbewertung zu konzipieren.

Um zukünftig ökonomische und ökologische Kriterien gleichermaßen bei betrieblichen Entscheidungen berücksichtigen zu können, wird in Kap. 5 zunächst ein Gesamtkonzept vorgestellt, bevor in Kap. 6 ein systematischer Ansatz zur Ermittlung einer geeigneten Datenbasis beschrieben wird. Anschließend werden eine Bewertungslogik zur Verknüpfung der Daten und Werthaltungen zu einem an der jeweiligen Aufgabenstellung orientierten Bewertungsergebnis (s. Kap. 7) und eine Vorgehensweise zum Einsatz der Methode für die unterschiedlichen Anwendungsfälle dargestellt (s. Kap. 8). Mit der Bewertung der neuen Produktionstechnologie des Magnesiumspritzgießens im Vergleich zum etablierten Druckgießen erfolgt in Kap. 9 eine exemplarische Anwendung der neu entwickelten Methode.

## **5 Konzept der Methode der Integrierten Bewertung**

### **5.1 Integration von ökologischer und ökonomischer Bewertung**

Voraussetzung für die Konzeption einer Methode zur ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien ist eine übergeordnete, gemeinsame Zielsetzung, aus der sich Bewertungskriterien und entscheidungsrelevante, mit Hilfe der Bewertungsmethode zu ermittelnde Größen ableiten lassen. Übergeordnetes Ziel einer an umweltlichen und betriebswirtschaftlichen Aspekten gleichermaßen orientierten taktischen Produktionsplanung ist die Realisierung sowohl ökologisch als auch ökonomisch effizienter Produktionsprozesse und -technologien. Hierunter ist die Erfüllung der Produktionsaufgabe bei gleichzeitiger Minimierung von Kosten und Auswirkungen auf die Umwelt zu verstehen [Müller-Christ 2001]. Für den jeweiligen Bewertungsfall kann diese allgemeine Zielsetzung noch um weitere, unternehmensspezifische technologische, umweltrechtliche oder investitionspolitische Vorgaben ergänzt werden [Steger 1993; Heinen 1991; Wöhe 1986; Reime 1971].

Im Unterschied zu den bislang bekannten Methoden (s. Kap. 3) erfolgt die Ermittlung der Umweltauswirkungen und der Kosten bzw. Wirtschaftlichkeit von Prozessen nicht mehr getrennt und unabhängig voneinander. Statt dessen wird der ökologischen und ökonomischen Bewertung in dieser Arbeit eine einzige, gemeinsame Datenbasis zugrunde gelegt, die im Mittelpunkt der Methode steht und den Ansatzpunkt zur Verknüpfung der beiden Teilbewertungen bildet (Abb. 11). Hierdurch werden zum einen Inkonsistenzen aufgrund fehlender Abstimmung vermieden, z.B. bei der Detaillierungstiefe und der verursachungsgerechten Zuordnung. Zugleich verringert sich der Aufwand für die Ermittlung der erforderlichen Daten und Informationen aufgrund der gemeinsamen Betrachtung erheblich und bei einer Änderung von Randbedingungen müssen nicht mehr alle Daten vollkommen neu erhoben werden. Von entscheidendem Vorteil ist jedoch, daß deutlich wird, welche Parameter sowohl einen Einfluß auf die Umweltauswirkungen, als auch auf die Kosten haben. Auf diese Weise lassen sich zwischen diesen Größen bestehende Zusammenhänge systematisch identifizieren und für eine gleichzeitige Optimierung der Umwelt- und Kostensituation durch geeignete Modifikationen des Prozesses nutzen.

In Kap. 2.1 wurde eine Bewertung definiert als eine Verknüpfung von Daten und Informationen mit Kriterien, Werthaltungen und Präferenzen des Bewertenden zu einer Bewertungsaussage. Die Bewertungsmethode beinhaltet daher einen Modellierungsansatz, um den realen Prozeß von der Prozeßebene auf eine Datenebene derart abzubilden, daß sowohl eine Bewertung anhand ökologischer, als auch betriebswirtschaftlicher Kriterien möglich ist. D.h. es erfolgt eine Transformation der Sachspäre in eine Datensphäre (s. Abb. 11). Mit der Aufbereitung der ermittelten Datenbasis zu Bewertungs- und anschließend zu Entscheidungsgrößen erfolgt der Übergang zur Wertesphäre, da die Bewertungsgrö-

ßen ein quantifiziertes Abbild der Realität bezüglich der für die Bewertung herangezogenen Kriterien darstellen.<sup>1</sup>

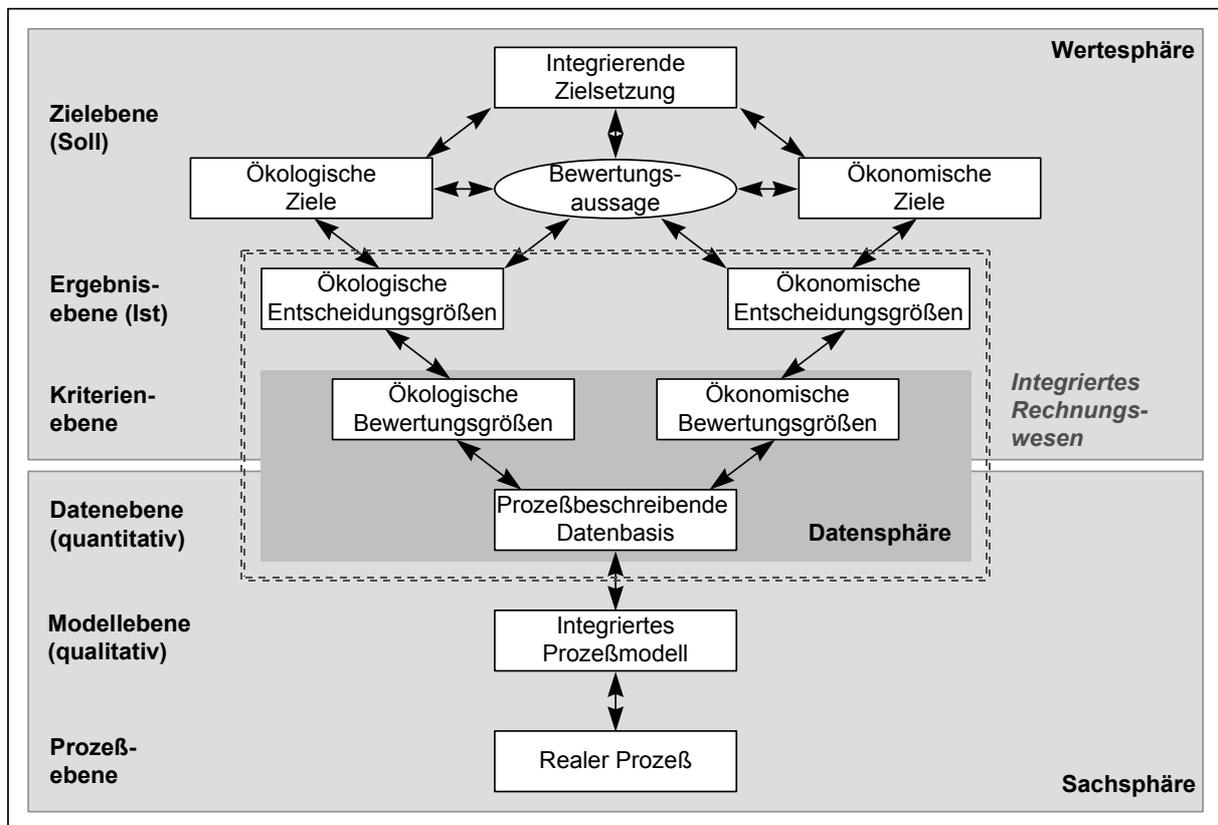


Abb. 11: Systemansatz des Integrierten Rechnungswesens: Integration von ökologischer und ökonomischer Bewertung über eine gemeinsame Datenbasis

Kriterien und Bewertungsgrößen sind zentrale Elemente einer jeden Bewertung, die zu Beginn einer Methodenentwicklung festzulegen sind (s. Kap. 5.2), um eine zielorientierte und aufwandsminimierte Datenerfassung zu gewährleisten. In Kap. 5.3 wird dann die zur Ermittlung der Bewertungsgrößen erforderliche gemeinsame prozeßbeschreibende Datenbasis definiert und in Kap. 5.4 ein geeignetes Prozeßmodell zur Erfassung derselben vorgestellt.

Da die weitere Verdichtung der Bewertungsgröße zu Entscheidungsgrößen unter Einbeziehung von subjektiven Werthaltungen und Präferenzen erfolgt (die zudem je nach Bewertungssituation unterschiedlich sein können), ist dieser Schritt bereits der Wertesphäre zuzurechnen. In Kap. 7 werden hierzu geeignete Kenngrößen vorgeschlagen, die speziell auf eine Bewertung im Rahmen der taktischen Produktionsplanung zugeschnitten sind. Dabei wird auf eine Aggregation zu einer einzigen Größe bewußt verzichtet, da es sich bei den ökologischen und betriebswirtschaftlichen Zielen um eigenständ-

<sup>1</sup> Die ermittelte Datenbasis und auch die daraus abgeleiteten Bewertungsgrößen werden darüber hinaus der Datensphäre zugeordnet, die durch Fakten geprägt ist und auf allgemein anerkannten naturwissenschaftlichen bzw. betriebswirtschaftlichen Grundsätzen beruht.

dige Wertvorstellungen handelt, die nicht in einen kausalen Zusammenhang zueinander gebracht werden können (s. Kap. 3). Statt dessen erfolgt eine transparente Aufbereitung der komplexen Bewertungssituation in Form von zwei aggregierten Entscheidungsgrößen, die aus einer gemeinsamen, konsistenten Datenbasis abgeleitet wurden. Bei der abschließenden Ableitung einer Bewertungsaussage ist anhand dieser Entscheidungsgrößen zu prüfen, inwieweit das die ökologischen und ökonomischen Ziele und Vorgaben erfüllt werden.

Zur Unterstützung der Schritte der Datenermittlung und -aufbereitung zu Entscheidungsgrößen wird in Kap. 5.5 ein Integriertes Rechnungswesen als unterstützender Systemansatz konzipiert und in den Kap. 6 und 7 detailliert. In Kap. 8 werden dann noch eine Vorgehensweise zur Umsetzung und verschiedene Ausprägungsformen der Methode für unterschiedliche Bewertungsaufgaben vorgestellt, bevor in Kap. 9 eine exemplarische Anwendung erfolgt.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die hier entwickelte Methode zur ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien verkürzend auch als "Methode der Integrierten Bewertung" bezeichnet.

## 5.2 Ökologische und ökonomische Bewertungsgrößen

Wie in Abb. 11 dargestellt, stellt die Verwendung einer gemeinsamen prozeßbeschreibenden Datenbasis, die nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewertet wird, ein wesentliches Element zur Integration von ökologischer und ökonomischer Bewertung dar. Um unnötigen Aufwand bei der Erfassung zu vermeiden, sollte sich die Datenbasis an den zu ermittelnden Bewertungsgrößen orientieren. Bei den Bewertungsgrößen handelt es sich wiederum um die quantitativen Ausprägungen derjenigen Kriterien, die sich aus der übergeordneten Zielstellung ergeben und das Wertesystem der Person, die die Bewertung durchführt, repräsentieren.<sup>1</sup> Entsprechend der hohen Bedeutung, die der Festlegung geeigneter Kriterien und Bewertungsgrößen für die Ausgestaltung der gesamten Bewertungsmethode beizumessen ist, wird ihre Definition an den Anfang der Konzeptbeschreibung der Methode der Integrierten Bewertung gestellt.

Zur ökologischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien werden Kriterien und Bewertungsgrößen herangezogen, die eine Operationalisierung allgemein anerkannter Umweltschutzziele [Kanning 2001; Enquête 1994] sowie des allgemein akzeptierten Leitbilds der "Nachhaltigen Entwicklung"<sup>2</sup> darstellen. Aufgrund ihrer breiten Akzeptanz und naturwissenschaftlichen Ableitung kommen

---

<sup>1</sup> Während Bewertungskriterien allgemeingültig sind und dazu dienen, ein anzustrebendes Ziel meßbar zu machen, handelt es sich bei den Bewertungsgrößen um die quantitativen Ausprägungen der Kriterien für einen spezifischen Bewertungsfall. (Bsp.: Anschaffungskosten sind ein Kriterium. Die Anschaffungskosten der Alternative A in Höhe von 1 Mio. DM sind die zu A gehörige Bewertungsgröße.)

<sup>2</sup> Zur Definition des Leitbilds "Nachhaltige Entwicklung" vgl. [Poppe 2001; Forum Info 2000, 1998]

bei der Methode der Integrierten Bewertung die Beiträge zu den Umweltwirkungskategorien als Kriterien und Umweltwirkungen als ökologische Bewertungsgrößen zum Einsatz.<sup>1</sup> Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Stahl [Stahl 1999] hinsichtlich Abbildbarkeit, Konsensfähigkeit und Praktikabilität von Wirkungskategorien bei der Ökobilanzierung werden die in Abb. 12 dargestellten Umweltwirkungen als ökologische Bewertungsgrößen herangezogen, da auf diese Weise sowohl globale, regionale und lokale Umweltwirkungen [Saur 1996b; BUM/UBA 1995], als auch alle wesentlichen Umweltproblemfelder [Rat 1998] berücksichtigt werden können.

		Ökologische Bewertungsgrößen: Umweltwirkungen		
		Ökosystembeeinflussung	Ressourcenverzehr	Gesundheitsbelastung
Geographische Reichweite und Bedeutung	Globale Umweltwirkungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Treibhauspotential (GWP<sub>100</sub>)</li> <li>• Ozonzerstörungspot. (ODP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieeinsatz</li> <li>• Energieträgereinsatz</li> <li>• Materialeinsatz</li> </ul>	-*
	Regionale Umweltwirkungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Versauerungspotential (AP)</li> <li>• Abfallmenge (ggf. nach Abfallarten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wassereinsatz</li> </ul>	-*
	Lokale Umweltwirkungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eutrophierungspotential (EP)</li> <li>• Ökotoxisches Effektpotential (EPPF)</li> </ul>	-*	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ggf. Humantoxizität</li> <li>• ggf. Einhaltung MAK-Werte</li> </ul>
		<b>Repräsentiertes Umweltproblemfeld</b>		

\* keine Bewertungsgrößen vorhanden

Abb. 12: Größen zur ökologischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien

Für den ökonomische Teil der Bewertung werden die den Produktionsprozessen und -technologien zurechenbaren investitions- und betriebsabhängigen Kosten als Bewertungskriterien berücksichtigt, da mit dieser Basis sowohl eine Kosten- als auch eine Investitionsrechnung unterstützt werden. Unter investitionsabhängigen Kosten werden in diesem Zusammenhang alle diejenigen Kosten verstanden, die für die Einrichtung des Leistungspotentials, also für Planung, Beschaffung und Anlauf des Investitionsobjekts, entstehen. In der Regel handelt es sich hierbei um einmalige Kosten bezogen auf die Nutzungsdauer der Investition. Die betriebsabhängigen Kosten umfassen dagegen alle zurechenbaren Kosten für die Leistungsbereitschaft und für die Leistungserstellung. Die genannten Kosten werden zudem noch nach folgenden Kostenarten differenziert [Heinen 1991]:

<sup>1</sup> In der Methode der Integrierten Bewertung wird die quantitative Ausprägung eines Kriteriums "Bewertungsgröße" genannt. Dementsprechend wird die Ausprägung eines Wirkungsindikators (Kriterium) als "Umweltwirkung" (Bewertungsgröße) bezeichnet. In der Nomenklatur der Ökobilanzierung wird die Bewertungsgröße "Umweltwirkung" auch als "Wirkungsindikatorergebnis" bezeichnet. Beschreibung der Wirkungskategorien und -indikatoren z.B. in [Poppe 2001; Eberle 2000]

- Personalkosten
- Fertigungsmaterialkosten
- Betriebsmittel- und Sachkosten
- Kapital- und kalkulatorische Kosten
- Kosten für empfangene Dienstleistungen
- Steuern, Gebühren und sonstige Kosten.

Eine Ausweisung von Umweltkosten als eigenständige Kostenart wird aus den in Kap. 3 genannten Gründen abgelehnt. Dies betrifft zum einen die Kosten des betrieblichen Umweltschutzes, d.h. Kosten zur Vermeidung von Umweltbelastungen, da diese bereits im Rahmen des betrieblichen Rechnungswesens erfaßt werden bzw. bei integrierten Technologien überhaupt nicht separat erfaßt werden können. Ebenfalls abgelehnt wird die Berücksichtigung externer Umweltkosten, da diese Aufwendungen im volkswirtschaftlichen Sinn darstellen und nicht vom Unternehmen getragen werden bzw. sich nicht im betrieblichen Rechnungswesen niederschlagen [Fichter 1997].

### **5.3 Prozeßbeschreibende Datenbasis**

Im Gegensatz zu bislang bekannten Methoden, bei denen die Ermittlung der ökologischen und ökonomischen Bewertungsgrößen auf voneinander unabhängigen Rechenwegen und unter Verwendung unterschiedlicher, nicht abgestimmter Datenbasen erfolgt, wird der Berechnung der Bewertungsgrößen bei der Methode der Integrierten Bewertung eine gemeinsame, prozeßbeschreibende Datenbasis zugrunde gelegt. Diese repräsentiert ein Mengengerüst aller sowohl für eine ökologische, als auch ökonomische Bewertung relevanten In- und Outputs des zu bewertenden Prozesses und wird mit Hilfe eines entsprechenden Modellierungsansatzes (s. Kap. 5.4) erstellt.

Für die Ermittlung der Umweltwirkungen als ökologische Bewertungsgrößen sind die einem Prozeß zurechenbaren Stoff- und Energieflüsse von Bedeutung, da sich ökologische Auswirkungen eines Produktionsprozesses entweder auf Entnahmen aus der Umwelt (in Form von Energie- und Ressourcenverbräuchen), oder auf Emissionen in die Umwelt zurückführen lassen. Auf Basis eines Mengengerüsts dieser Flüsse können die Umweltwirkungen gemäß der in DIN EN ISO 14042 ausgeführten Methode zur Wirkungsabschätzung in den Schritten Klassifizierung und Charakterisierung berechnet werden (s. Kap. 3.1 und [ISO 14042, 2000]). Bei der Klassifizierung werden Relationen zwischen den Stoff- und Energieflüssen und den in Kap. 5.2 ausgewählten Umweltwirkungskategorien hergestellt, wobei die Zuordnung eines Flusses zu mehreren Wirkungskategorien möglich ist. Die Charakterisie-

rung, mit der die Beiträge zu den einzelnen Umweltwirkungskategorien quantifiziert wird, läßt sich vereinfacht beschreiben als

$$(1) \text{ Umweltwirkung} = \text{Menge} * \text{Charakterisierungsfaktor}$$

Der Operand "Menge" repräsentiert die quantitative Ausprägung des jeweiligen Flusses und ist prozeßabhängig. Beim Charakterisierungsfaktor handelt es dagegen sich um eine spezifische Eigenschaft (Qualität) eines Stoff- bzw. Energieflusses, die die Stärke seiner Wirkung hinsichtlich der betrachteten Umweltwirkungskategorie angibt. Mathematisch gesehen ist eine Differenzierung zwischen Klassifizierung und Charakterisierung bei der Berechnung der Umweltwirkungen nicht erforderlich, da die Zuweisung zu einer Umweltwirkungskategorie lediglich bedeutet, daß der Charakterisierungsfaktor eines Flusses für diese Kategorie größer Null ist. Da in letzter Konsequenz jeder Stoff- und Energiefluß, der einem Prozeß zugeführt wird bzw. diesen verläßt, potentiell relevant für eine ökologische Bewertung sein kann, sind prinzipiell alle stofflichen und energetischen Input-Output-Flüsse mengenmäßig zu erfassen, um sie einer ökologischen Bewertung zugänglich zu machen.<sup>1</sup>

Für die ökonomische Bewertung entscheidend sind die vom Prozeß verursachten Kosten, wobei Kosten den in Geldeinheiten bewerteten Verzehr an Produktionsfaktoren im Rahmen der betrieblichen Leistungserstellung und zur Aufrechterhaltung der dafür benötigten Kapazitäten beschreiben [Heinen 1991]. Kosten sind stets bedingt durch eine Prozeßleistung und entstehen sowohl für die Leistungseinheiten, als auch für die Leistungsbereitschaft und die suboptimale Gestaltung der Prozesse der Leistungserstellung. Unter Verzehr ist in diesem Zusammenhang der Verzehr von Stoffen (physischer Verbrauch bzw. Veränderung ihrer Verfügbarkeit), Betriebsmitteln (Verminderung ihres Nutzungspotentials durch Inanspruchnahme), Nutzungsmöglichkeiten durch Zeitablauf (z.B. Lizenzen) oder Inanspruchnahme von Potentialen (z.B. Prämien) sowie der Verzehr öffentlicher Leistungen (z.B. Gebühren und Abgaben) zu verstehen. Mathematisch gesehen sind Kosten das Produkt aus einer Mengeneinheit und einer Wertkomponente [Heinen 1991] und berechnen sich nach der Formel:

$$(2) \quad \text{Kosten} = \text{Menge} * \text{Verrechnungspreis}$$

Der Faktor "Menge" quantifiziert dabei die Inanspruchnahme eines Produktionsfaktors oder einer Leistung, während der "Verrechnungspreis" den Kostenwert pro Mengeneinheit wiedergibt und zum Beispiel ein Materialeinstandspreis, Personalstundensatz oder Verrechnungspreis für eine innerbetriebliche Leistungen sein kann.

---

<sup>1</sup> Die Relevanz eines Flusses hängt zum einen von der Art und der Menge des Flusses ab (absolute Bedeutung) und zum anderen von seiner relativen Bedeutung für das Gesamtergebnis.

Als Gegenbegriff zu Kosten bezeichnen Leistungen in der Betriebswirtschaftslehre durch die betriebliche Tätigkeit entstandene Wertzuwächse, wie zum Beispiel Erlöse aus dem Verkauf von Produkten oder Reststoffen zur Verwertung [Wöhe 1986]. Analog zur Vorgehensweise bei Kosten berechnen sich Leistungen wie folgt:

$$(3) \quad \text{Leistung} = \text{Menge} * \text{Verrechnungserlös}$$

Mathematisch gesehen besteht zwischen Kosten und Leistungen nur dem Vorzeichen nach ein Unterschied. Verrechnungserlöse können demnach als "negative Verrechnungspreise" und Leistungen als "negative Kosten" aufgefaßt werden. Bei Anwendung dieser Definition ist es möglich, die betriebswirtschaftliche Bewertung eines Prozesses auf eine mathematische Berechnung der Kosten unter Anwendung positiver und negativer Verrechnungspreise zu reduzieren.

Aus den aufgezeigten Zusammenhängen ergibt sich, daß ein Mengengerüst aller aus Umwelt- bzw. Kostensicht relevanten In- und Outputs geeignet ist, einen Prozeß vollständig zu beschreiben und als gemeinsame zentrale Datenbasis zu fungieren, aus der sich die ökologischen und ökonomischen Bewertungsgrößen "Umweltwirkungen" bzw. "Kosten" berechnen lassen.

#### **5.4 Integriertes Prozeßmodell zur Ermittlung der prozeßbeschreibenden Datenbasis**

Zur Ermittlung des vorgenannten Mengengerüsts kommt ein Prozeßmodell zum Einsatz, das eine vollständige Beschreibung des Prozesses hinsichtlich der sowohl aus ökologischer, als auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht relevanten Flüsse und ihrer quantitativen Ausprägungen ermöglicht. Während für die ökologische Bewertung stofflich-energetische Flüsse wesentlich sind, sind bei einer ökonomischen Bewertung vor allem produktionsfaktor- bzw. leistungsbezogene Flüsse von Interesse. Ein Teil der betrachteten Flüsse ist jedoch für beide Bewertungen gleichermaßen von Bedeutung, z.B. Rohmaterial- und Energieeinsatz.

Das in dieser Arbeit konzipierte "Integrierte Prozeßmodell" stellt eine Weiterentwicklung und Verknüpfung ökologischer und betriebswirtschaftlicher Modellierungsansätze dar und beinhaltet sowohl ein ökologisch, als auch ein ökonomisch relevantes Partialmodell (Abb. 13).

Das ökologische Teilmodell entspricht dem Input-Output-Modell der stofflichen und energetischen Flüsse der Sachbilanz. Beim ökonomischen Partialmodell handelt es sich dagegen um eine Weiterentwicklung bekannter Prozeßmodelle aus der Betriebswirtschaftslehre. Die Modifikation ist erforderlich, da das üblicherweise angewandte "wertorientierte Input-Output-Modell", bei dem Wertverzehr (Kosten) der Inputseite und Wertzuwachs (Leistung) der Outputseite zugerechnet wird, der allgemeinen Auffassung von Input als Prozeßeingangsgrößen und Output als aus dem Prozeß resultierende Größen

widerspricht. (Denn Leistungsverzehr kann durchaus auch mit den Ergebnissen eines Prozesses verbunden sein, wie z.B. Entsorgungskosten für im Prozeß erzeugte Abfälle.)

Statt dessen wird in dieser Arbeit auch das ökonomische Partialmodell als ein "flußorientiertes Input-Output-Modell" zur Ermittlung eines kostenmäßigen Mengengerüsts aufgefaßt. Auf der Inputseite werden die Voraussetzungen für die Durchführung des Prozesses als Eingangsgrößen erfaßt. Hierbei handelt es sich primär um den Verzehr an Produktionsfaktoren und Leistungen. Der Output repräsentiert dagegen die Ergebnisse der Prozeßdurchführung und umfaßt die aus der Prozeßdurchführung resultierenden Leistungszuwachs in Form von Produkten und den durch Prozeßergebnisse verursachten Leistungsbedarf bzw. -verzehr.

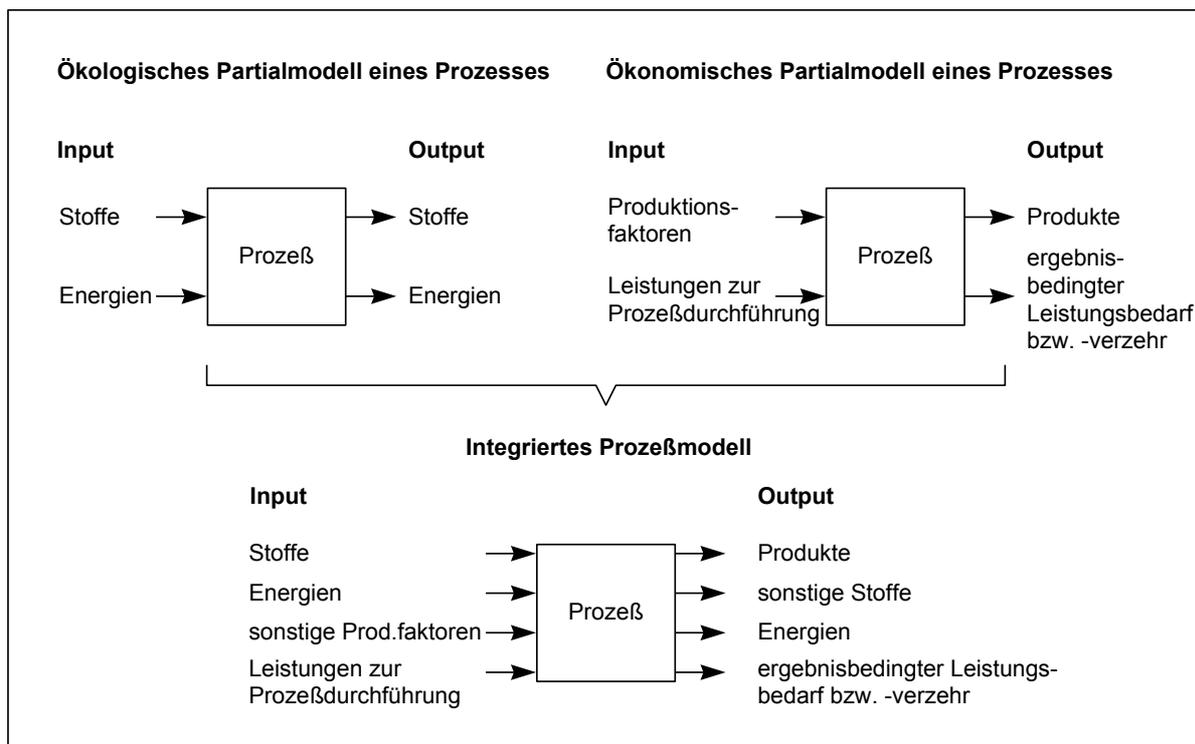


Abb. 13: Integriertes Prozeßmodell zur Ermittlung einer gemeinsamen Datenbasis [Schultz 1997]

Das Integrierte Prozeßmodell entspricht somit einer Erweiterung des aus der Methode der Ökobilanzierung bekannten Sachbilanzmodells um Flüsse, die zusätzlich für eine Kostenbetrachtung relevant sind. Als Ergebnis der Modellierung liegt eine Prozeßbeschreibung in Form eines vollständigen qualitativen Abbilds aller relevanten Flüsse einschließlich des zugehörigen quantitativen Mengengerüsts vor. Diese Datenbasis auf der Flußebene eines Prozesses bildet das Rückgrat der Bewertung und erlaubt eine Kopplung von Umweltwirkungs- und Kostenbetrachtung (s. Abb. 11). Als formales Bindeglied fungieren dabei die quantitativen Ausprägungen der Flüsse, mit deren Hilfe sowohl die mit ihnen verbundenen Umweltwirkungen als auch Kosten (bzw. Leistungen) berechnet werden können. In Kap. 6.2.1 wird mit dem Integrierten Kontenplan ein Instrument vorgestellt, das bei einer systematischen Prozeßmodellierung und Strukturierung der resultierenden Datenbasis unterstützt.

Bei der Auswertung des mit Hilfe des Integrierten Prozeßmodell ermittelten Mengengerüsts wird dieses durch eine - je nach Intention ökologische oder ökonomische - "Brille" betrachtet, bei dem die jeweils nicht relevanten Flüsse automatisch ausgeblendet werden, da die entsprechenden Charakterisierungsfaktoren bzw. Verrechnungspreise gleich Null sind (Abb. 14).

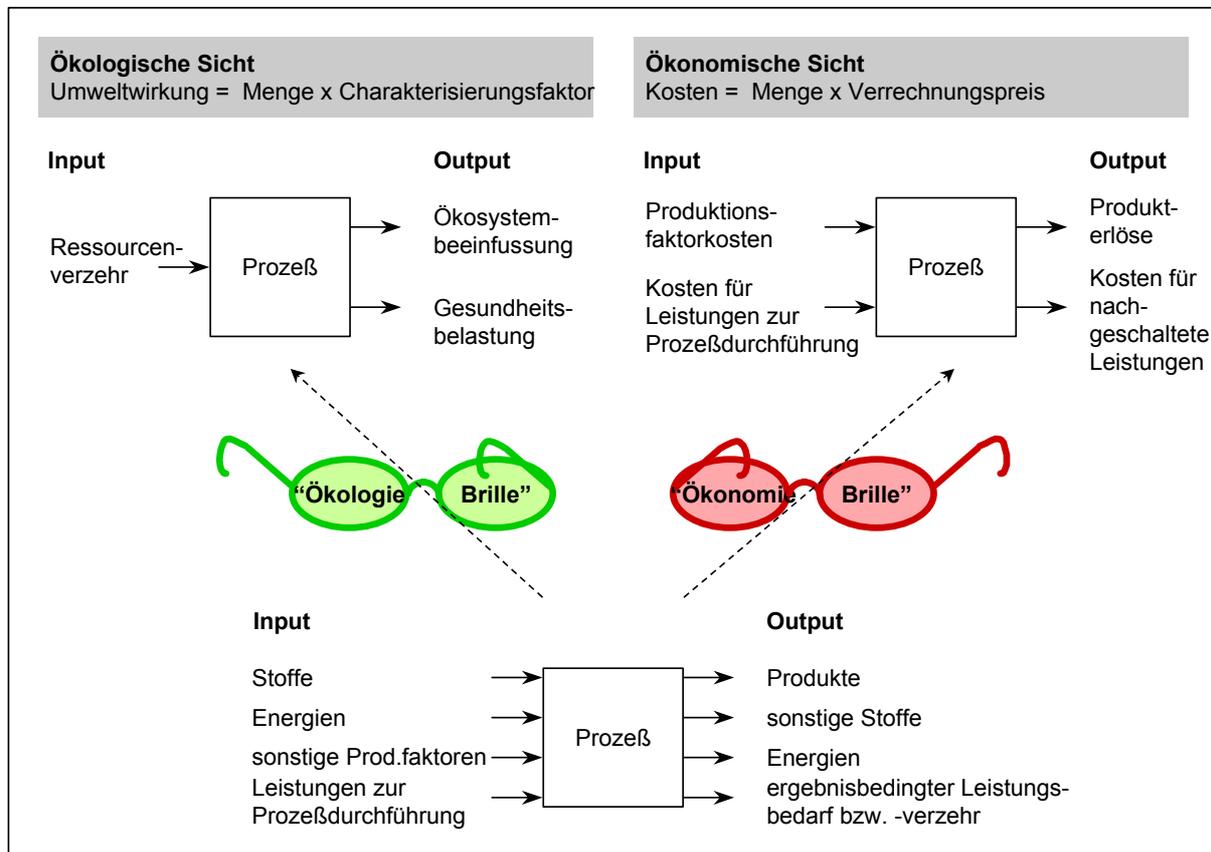


Abb. 14: Auswertung der mit Hilfe des Integrierten Prozeßmodells ermittelten Datenbasis

Im weiteren Verlauf werden die unterschiedlichen In- und Outputs als Flußarten bezeichnet, um zu verdeutlichen, daß bei der Methode der Integrierten Bewertung nicht nur stoffliche und energetische In- und Outputs berücksichtigt werden. Mit den Flußarten werden Stoff-, Energie-, Produktionsfaktoren- und Leistungsflüsse eindeutig identifiziert. Zur vollständigen Charakterisierung der Flüsse sind jedoch noch weitere Angaben erforderlich, die in Tab. 10 zusammengestellt sind.

<b>Merkmal</b>	<b>Erläuterung</b>
Flußart	qualitative Charakterisierung des Flusses
Flußrichtung	Input, Output
Flußgröße	quantitative Ausprägung des Flusses ("Menge")
Ursprung bzw. Ziel	Umwelt oder anderer Prozeß(schritt)
Dimension der Flußgröße	Maßeinheit der Flußgröße; Beschränkung auf folgende Basiseinheiten und deren Kombination: Stoff [kg], Energie [kWh], Kapazität/Zeit [h], Fläche [m <sup>2</sup> ], monetärer Fluß [DM], dimensionslose Zählgröße [-]
Bezugsgröße der Flußgröße	Ausbringungs- oder Zeitgröße, auf die sich die Flußgröße bezieht, z.B. Produkteinheit oder Jahr (s. Kap. 6.2.4)

Tab. 10: Charakterisierung eines Flusses

## 5.5 Integriertes Rechnungswesen als unterstützender Systemansatz

Aufgrund der eigenständigen ökologischen und ökonomischen Betrachtungsweisen war die Ermittlung von Umweltwirkungen und Kosten bislang nur im Rahmen separater Sonderrechnungen möglich. Mit Hilfe des Integrierten Prozeßmodells kann dagegen eine gemeinsame prozeßbeschreibende Datenbasis in Form eines Mengengerüst aller In- und Outputs gewonnen werden, aus der sich die ökologischen und ökonomischen Bewertungsgrößen berechnen lassen.

Zur Operationalisierung dieses Ansatzes und zur systematischen Unterstützung der Methode der Integrierten Bewertung wird an dieser Stelle eine Weiterentwicklung der ökologieorientierten Energie- und Stoffflußrechnung der Ökobilanzierung und der betrieblichen Kostenrechnung vorgeschlagen. Ziel ist die Integration von ökologischer und betriebswirtschaftlicher Rechnung zu einem "Integrierten Rechnungswesen", das definiert wird als ein System zur umfassenden quantitativen Erfassung und Aufbereitung aller betrieblichen Daten, die für eine ökologische und ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen erforderlich sind.

Abgeleitet aus dieser Definition ergeben sich folgende Aufgaben eines Integrierten Rechnungswesens:

- Unterstützung einer systematischen und verursachungsgerechten Erfassung des Mengengerüsts aller Flüsse als prozeßbeschreibende Datengrundlage.
- Berücksichtigung und Wiedergabe der Charakteristik der erfaßten Daten, insbesondere ihrer Reagibilität, d.h. ihrer Abhängigkeit von anderen Einflußgrößen und Parametern.
- Ermittlung der Bewertungsgrößen Umweltwirkungen und Kosten als Grundlage für die Ableitung einer Bewertungsaussage.
- Gliederung, Aggregation und Darstellung der Informationen und Ergebnisse derart, daß Zusammenhänge zwischen Flüssen, Umweltwirkungen und Kosten aufgezeigt und eine detaillierte Analyse ermöglicht werden.

In Anlehnung an das betriebliche Rechnungswesen besteht das Integrierte Rechnungswesen aus einer Grund- und einer Auswertungsrechnung.

Aufgabe der Grundrechnung ist die strukturierte Ermittlung des Mengengerüsts auf der Basis des Integrierten Prozeßmodells und die Aufbereitung der Datengrundlage zu den Bewertungsgrößen Umweltwirkungen und Kosten. Die verursachungsgerechte Datenerfassung erfolgt im Rahmen der in Kap. 6.2 vorgestellten Flußartenrechnung, während in Kap. 6.3 und 6.4 zur Berechnung der Bewertungsgrößen entsprechende Umweltwirkungsarten- und Kostenartenrechnungen beschrieben werden.

In einer anschließenden Auswertungsrechnung, die in Kap. 7 detailliert ausgeführt wird, werden die Bewertungsgrößen in Entscheidungsgrößen transformiert, die dann durch einen Vergleich mit Zielvorgaben oder Alternativen zur Ableitung einer Bewertungsaussage und als Grundlage für eine Entscheidungsfindung herangezogen werden können. In Abb. 15 ist der Aufbau des Integrierten Rechnungswesens dargestellt und aufgezeigt, wie bestehende Konzepte bei der Integration von ökologischem und ökonomischem Rechnungswesen eingebunden werden.

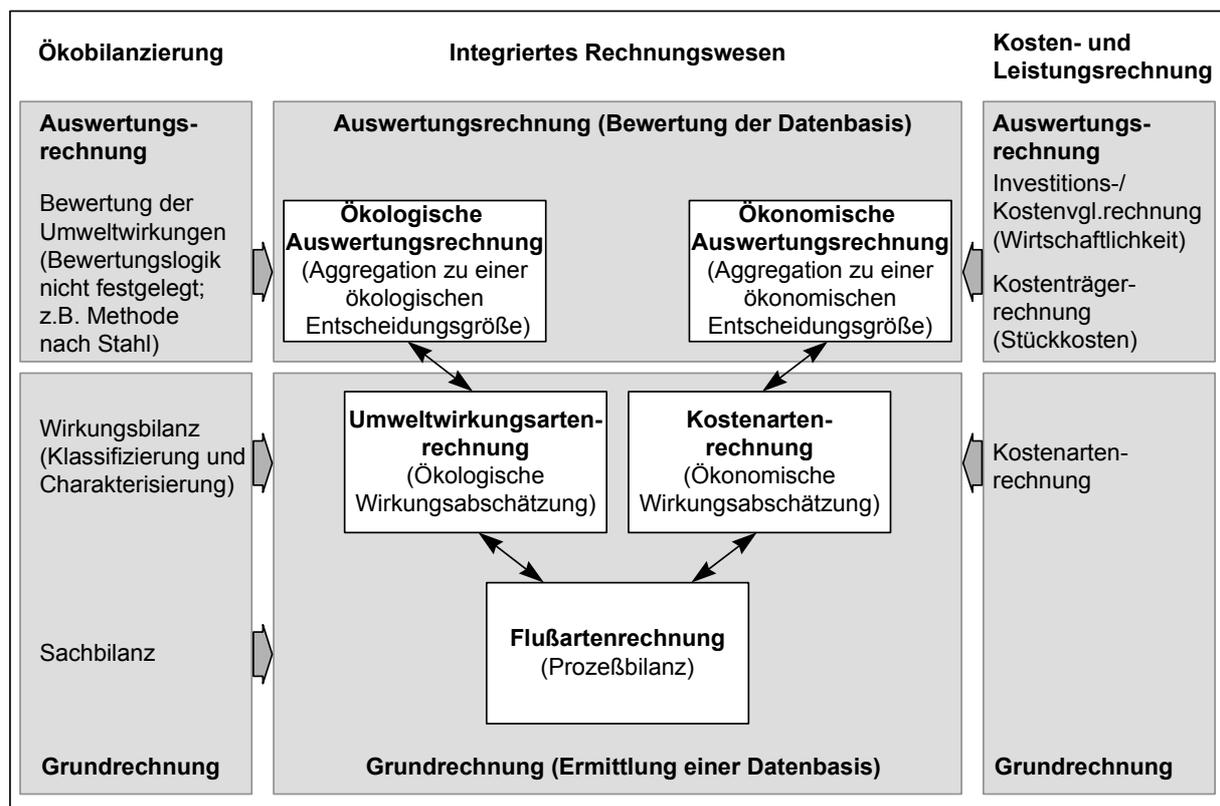


Abb. 15: Überführung bestehender Ansätze aus Ökobilanzierung, Kosten- und Leistungsrechnung in Komponenten des Integrierten Rechnungswesens

Bei der Aufbereitung des gemeinsamen Mengengerüsts erfolgt zwar eine formale Trennung von Umwelt- und Kostenbetrachtung, jedoch ist es jederzeit möglich, den Zusammenhang zwischen Umwelt-

wirkungspotentialen und Kosten aufzuzeigen, da diese über die zugrunde liegenden Flüsse und Mengen gekoppelt sind. Hierdurch ist nicht nur ein Wechsel von der ökologischen in die ökonomische Rechnung möglich (und umgekehrt). Vielmehr werden auch die Relationen zwischen ökologischer und ökonomischer Zielerreichung transparent gemacht (s. Abb. 11), da eindeutig zu erkennen ist, welche Faktoren sich positiv bzw. negativ auf die Kosten und Umweltwirkungen auswirken und wie stark sie diese beeinflussen.

Ein entscheidender Vorteil der formalen Trennung ist, daß auf eine Differenzierung, zu welchem Anteil betriebliche Maßnahmen dem Umweltschutz dienen, ebenso verzichtet werden kann, wie auf eine Abgrenzung von Umweltschutzkosten und anderen Kostenarten. Auf diese Weise können die mit einer derartigen Unterscheidung sonst üblicherweise verbundenen methodischen Probleme vermieden werden.

Im Gegensatz zur traditionellen Ansicht, daß mehr Umweltschutz zwangsläufig zu höheren Kosten führt, unterstützt die dem Ansatz zugrunde liegende Flußorientierung die Grundannahme, daß ein geringerer Stoff- und Energieeinsatz sowie weniger Emissionen und Reststoffe prinzipiell dazu geeignet sind, sowohl geringere Umweltbelastungen als auch geringere Kosten zu verursachen. Im Endeffekt impliziert dies eine Rückbesinnung auf das ökonomische Prinzip. Da es sich bei den In- und Outputs um vom Unternehmen beeinflussbare Größen handelt, lassen sich Einflußfaktoren und Ansatzpunkte für Optimierungen systematisch ermitteln und Synergieeffekte für eine ganzheitliche Optimierung nutzen.

## 6 Grundrechnung der Methode der Integrierten Bewertung

### 6.1 Aufgabe der Grundrechnung

Nach der Vorstellung des Gesamtkonzepts zur Verknüpfung von Umwelt- und Kostenbewertung wird in diesem Kapitel die Grundrechnung der Methode der Integrierten Bewertung detailliert ausgeführt. Die Grundrechnung dient der Erfassung und Aufbereitung der gemeinsamen prozeßbeschreibenden Datenbasis und umfaßt die Komponenten

- Flußartenrechnung,
- Umweltwirkungsartenrechnung und
- Kostenartenrechnung.

Aufgabe der Flußartenrechnung ist die quantitative Erfassung der Inputs und Outputs, um eine Datengrundlage zur Berechnung der mit den Flüssen verbundenen Umweltwirkungen und Kosten zu schaffen. Das Ergebnis ist ein Mengengerüst in Form einer Prozeßbilanz.<sup>1</sup> Durch die Gliederung der Flußarten mit Hilfe eines Kontenplans (s. Kap. 6.2.1) ist eine systematische, eindeutige und redundanzfreie Erfassung der Flüsse gewährleistet. Für eine realitätsgetreue Abbildung des realen Prozesses und für eine spätere Verwendung der Ergebnisse für detaillierte Analysen oder die Bildung von Szenarien ist es erforderlich, die Flußgrößen verursachungsgerecht und unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Zurechenbarkeit und Reagibilität zu ermitteln (s. Kap. 6.2.2 und 6.2.3). In Abhängigkeit vom Ziel der Bewertung und der angestrebte Bewertungsaussage werden hierzu in Kap. 6.2.4 - 6.2.8 geeignete Bezugsgrößen und Verrechnungsprinzipien vorgestellt.

Die Umweltwirkungsartenrechnung dient der Abschätzung von Umweltwirkungen als Grundlage für eine ökologische Bewertung und umfaßt die Schritte Klassifizierung und Charakterisierung in Anlehnung an DIN EN ISO 14042 (s. Kap. 6.3). Die Umweltwirkungsarten sind durch die der Bewertung zugrunde liegenden Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren bestimmt und orientieren sich an den Umweltzielen des Unternehmens.

---

<sup>1</sup> Der Begriff "Bilanz" steht in diesem Zusammenhang für die Gegenüberstellung von Inputs und Outputs, wobei die Gültigkeit von Erhaltungssätzen eingeschränkt ist: Für Stoff- und Energieflüsse gilt zwar der Grundsatz der Massen- und Energieerhaltung aus der Ökobilanz und kann für Plausibilitätskontrollen oder zur Berechnung unbekannter Größen genutzt werden. Für Produktionsfaktoren und -leistungen lassen sich jedoch auf der Ebene der Flußartenrechnung keine Erhaltungssätze formulieren. Allenfalls könnte im Rahmen einer Kostenrechnung eine Werterhaltung gefordert werden, bei der sich das betriebswirtschaftliche Ergebnis (Gewinn oder Verlust) aus der Differenz von Leistungen und Kosten ergibt.

Die aus der Betriebswirtschaftslehre bekannte Kostenartenrechnung hat im Rahmen der entwickelten Methode die Aufgabe einer verursachungsgerechten Erfassung sämtlicher dem Prozeß zurechenbarer Kosten. Es handelt sich um eine Flußkostenrechnung, bei der den einzelnen In- und Outputflüssen Kosten zugewiesen werden und die Kosten nach Kostenarten differenziert werden (s. Kap. 6.4).

Zur Unterstützung der Ermittlung, Darstellung und Aufbereitung der Daten sowie zur Veranschaulichung der Berechnungsergebnisse "Umweltwirkungen" und "Kosten" wird die in Abb. 16 dargestellte Matrix eingesetzt. Ihr Aufbau entspricht den Komponenten der Grundrechnung und stellt einen allgemeinen Rahmen dar, der gegebenenfalls für den jeweiligen Bewertungsfall modifiziert und um spezifische Flüsse, Umweltwirkungen oder Kostenarten ergänzt werden kann.

			Umweltwirkungsartenrechnung							Kostenartenrechnung							
			Treibhauspotential	Ozonerstörungspotential	Versauerungspotential	Eutrophierungspotential	Ökotoxisches Effektpotential	Energie- und Energieträgereinsatz	Materialeinsatz	Wassereinsatz	Abfallmenge	Fertigungsmaterialkosten	Personalkosten	Betriebsmittel- und Sachkosten	Kapital- u. kalkulatorische Kosten	Kosten empfangener Dienstleistungen	Steuern, Gebühren und sonstige Kosten
Flußartenrechnung		Menge															
Flußart																	
Input	Ausgangsmaterial								x				x				
	Hilfs- u. Betriebsstoffe								x						x		
	Sonstige Stoffe		(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	x	(x)	(x)	(x)				x		
	Energie							x							x		
	Personal														x		
	Betriebsmittel														x	x	
	Sonstige Produktionsfaktoren															x	x
	Leistungen zur Prozeßdurchführung							(x)	(x)						x		
Output	Produkte			x	x	x	x										x*
	Abfall, Abwasser und Emissionen									(x)	x				x		x
	Sonstige Stoffe		x	x	x	x	x								x	x	x
	Energie							x							x		
	ergebnisbedingter Leistungsbedarf/- verzehr		x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x

x = typische Beziehungen    \* = Produkterlöse werden i.d.R. nicht betrachtet, sind hier jedoch der Systematik wegen aufgeführt.

Abb. 16: Schematische Darstellung der Ergebnisse der Grundrechnung<sup>1</sup>

Durch die einfache und klare Struktur der Matrix werden Zusammenhänge zwischen Ökologie und Ökonomie transparent. Flüsse, die sowohl besonders umwelt- als auch kostenrelevant sind (z.B. Ausgangsmaterial), zeichnen sich durch einen hohen Wert sowohl im Feld der Umweltwirkungsartenrechnung, als auch im Feld der Kostenartenrechnung aus. Andererseits lassen sich auch diejenigen Flüsse leicht identifizieren, die primär nur ökologisch bzw. nur ökonomisch relevant sind (z.B. Emissionen bzw. Personaleinsatz). Die Matrix ist somit von großer Bedeutung für die Analyse des Bewertungser-

<sup>1</sup> Bei den "x" in der Matrix handelt es sich um typische Beziehungen; andere Relationen sind ebenfalls möglich. Eine detailliertere Beschreibung der Flußarten erfolgt in Kap. 6.2.1.

gebnisses. Eventuell identifizierte Ansatzpunkte zur Optimierung der ökologischen, ökonomischen und der Gesamteffizienz können im Rahmen des Planungsprozesses dazu genutzt werden, um Produktionsprozesse bzw. den Einsatz von Produktionstechnologien optimal zu gestalten.

Im Anschluß werden die Komponenten der Grundrechnung - d.h. Flußarten-, Umweltwirkungsarten- und Kostenartenrechnung - dem in Kap 5 vorgestellten Konzept entsprechend ausgestaltet und operationalisiert, wobei das Ziel eine verursachungsgerechte Erfassung und Verrechnung der dem Prozeß zuzurechnenden Flüsse, Umweltwirkungen und Kosten ist.

## **6.2 Flußartenrechnung der Methode der Integrierten Bewertung**

### **6.2.1 Integrierter Kontenplan zur Klassifizierung der Flüsse**

Zur Unterstützung einer systematischen Prozeßmodellierung und zur Strukturierung der Datenbasis wird in der Methode der Integrierten Bewertung das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Instrument des Integrierten Kontenplans eingesetzt. Ähnlich wie das Integrierte Prozeßmodell handelt es sich bei diesem Instrument um eine systematische Weiterentwicklung und Verknüpfung bestehender Konzepte.

In der Literatur zu Ökobilanzierung und Umweltkennzahlen finden sich mit den sogenannten "ökologischen Kontenrahmen" bereits verschiedene Ansätze zur Klassifizierung der Flüsse. Übliche Kriterien zur Gliederung von Stoff- und Energiebilanzen sind beispielsweise Input bzw. Output, Stoff bzw. Energie, Substanzarten (chemische Zusammensetzung), Art der Herstellung bzw. Weiterverarbeitung oder Kategorien der ökologischen "Hauptwirkung" [Spengler 1998; BUM/UBA 1995]. Eine umfassende, allgemeingültige oder verbindliche Einteilung der Stoff- und Energieflüsse zur Unterstützung einer systematischen und vollständigen Modellierung und Datenermittlung ist bislang jedoch nicht bekannt. Um eine Vermischung von Datenerfassung und Bewertung zu vermeiden und um Redundanzen auszuschließen, empfiehlt sich eine Gliederung der Flüsse nach chemisch-physikalischen Gesichtspunkten. Aus ökonomischer Sicht liegt dagegen eine Strukturierung der Datenbasis in Anlehnung an die Kostenarten der Kostenrechnung oder die Gliederung der Kontenklasse 4 des Gemeinschaftskontenrahmens der deutschen Industrie nahe.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Integrierte Kontenplan stellt eine Synthese der genannten Gliederungskriterien dar. Zur Differenzierung der Inputs und Outputs wird die in Tab. 11 und Tab. 12 gezeigte Systematik angewandt. Stoff- und Energieflüsse werden demnach primär nach Kriterien unterscheiden, die von der Ökobilanzierung her bekannt sind, während die übrigen Flüsse nach betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten gegliedert werden.

<b>Integrierter Kontenplan</b>	
<b>INPUT</b>	
<b>Stoff</b>	<b>Beispiele</b>
Ausgangsmaterial	Rohstoffe, Werkstoffe, Halbzeuge, Vorprodukte, Rücknahmeprodukte zur Aufbereitung, Durchlaufstoffe (Throughput-Stoffe)
Hilfsstoffe	Klebstoffe
Betriebsstoffe	Schmieröle, Reinigungsmittel
Kreislaufmaterial	Kühlmedien, Spülgase
Wasser	Trinkwasser, Brunnenwasser, Regenwasser, Brauchwasser, sonstiges Wasser
Luft	Umgebungsluft
Verpackungen	Produkt-, Gebinde-, Transportverpackungen
<b>Energie</b>	
Primärenergie	Gas, Heizöl, Treibstoff, Kohle, regenerative Energieträger, elektrische Energie (Strom), techn. Wärme, Druckluft
Sekundärenergie	Elektrische Energie, Druckluft
<b>Personal</b>	
Direktes Personal	Direkt am Wertschöpfungsprozeß beteiligte Arbeitsleistung
Indirektes Personal	Den Wertschöpfungsprozeß unterstützende Arbeitsleistung
<b>Betriebsmittel</b>	
Produktionsanlagen	Maschinen, z.B. zur urformenden, umformenden und spanabhebenden Fertigung
Fertigungshilfsmittel	Passive Betriebsmittel mit direkter Fertigungsbeteiligung, z.B. Werkzeuge, Vorrichtungen, Prüfmittel
Aufbereitungsanlagen	Anlagen zur Aufbereitung von Hilfs-, Betriebsstoffen und Kreislaufmaterial
Versorgungstechnische Anlagen	Anlagen zur Versorgung mit Hilfs-, Betriebsstoffen und Kreislaufmaterial
Anlagen zur Emissionsminderung/-wandlung	End-of-pipe-Technologien
Entsorgungstechnische Anlagen	Anlagen zur Entsorgung bzw. Aufbereitung von Abfällen
Fabrikeinrichtungen	Fläche, Gebäude, Infrastruktur
Logistikeinrichtungen	Prozeßbedingte Förder- und Lagertechnik
<b>Sonstige Produktionsfaktoren</b>	
Potentiale mit Verzehr durch Zeitablauf	Lizenzen
Information	Daten, Meßwerte
Externe Faktoren	Infrastruktur
<b>Leistungen zur Prozeßdurchführung</b>	
Innerbetriebliche Leistungen	Leistungen anderer Prozesse
Leistungen Dritter	Externe Leistungen
Öffentliche Leistungen	Gebühren und Abgaben

Tab. 11: Allgemeiner Integrierter Kontenplan (Input)

<b>Integrierter Kontenplan</b>	
<b>OUTPUT</b>	
<b>Stoff</b>	<b>Beispiele</b>
Produkte mit Sachcharakter	Endprodukte, Zwischenprodukte, Hauptprodukte, Kuppelprodukte, Durchlaufstoffe (Throughput-Stoffe)
Ausschuß	Ausschuß zur Nacharbeit, Ausschluß zum Abfall
Kreislaufmaterial	Kühlmedien, Spülgase
Verpackungen	Produkt-, Gebinde-, Transportverpackungen
Abfälle	Nicht-überwachungsbedürftige/überwachungsbedürftige/besonders überwachungsbedürftige Abfälle zur Verwertung, überwachungsbedürftige/ besonders überwachungsbedürftige Abfälle zur Beseitigung
Abwasser	Abwasser zur Weiterverwendung, Wiederaufbereitung, Direkteinleitung, Einleitung in Kanalisation
Emissionen in die Luft	Feste, flüssige, gasförmige Emissionen
Emissionen in das Wasser	Feste, flüssige, gasförmige Emissionen
Emissionen in den Boden	Feste, flüssige, gasförmige Emissionen
<b>Energie</b>	
Verlustenergie	Abwärme, Strahlung
Nutzenergie	Prozeßwärme, elektrische Energie, Druckluft
<b>Sonstige Produktionsleistung</b>	
Immaterielle Güter bzw. Dienstleistungen	Service, Information
<b>Ergebnisbedingter Leistungsbedarf/- verzehr</b>	
Bedarf an innerbetrieblichen Leistungen	Nacharbeit von Ausschluß, Abwasseraufbereitung
Bedarf an Leistungen Dritter	Entsorgungsdienstleistung
Bedarf an öffentl. Leistungen	Gebühren, Steuern und Abgaben

Tab. 12: Allgemeiner Integrierter Kontenplan (Output)

## 6.2.2 Erfassungsumfang und -ebenen der Flüsse

Mit der Ausgestaltung der Flußartenrechnung wird nicht nur festgelegt, wie das Mengengerüst der Flüsse als quantitatives Abbild des zu bewertenden Prozesses zu ermitteln ist, sondern letztendlich auch, wie und in welchem Umfang ökologische und ökonomische Konsequenzen in die Bewertung mit einbezogen werden, da bei der Methode der Integrierten Bewertung alle Umweltwirkungen und Kosten auf Flüsse zurückgeführt werden.

Von entscheidender Bedeutung in diesem Zusammenhang ist das zugrunde gelegte Erfassungsprinzip. Da eine zukunftsgerichtete taktische Planung die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens langfristig beeinflusst, müssen eventuell vorhandene Optimierungspotentiale bereits im Planungsstadium erkannt werden. Aus diesem Grund wird dem Integrierten Rechnungswesen das finale Verursachungsprinzip (Zweck-Mittel-Prinzip) [Heinen 1991] zugrunde gelegt, nach dem alle diejenigen Umweltwir-

kungen und Kosten zu erfassen und verrechnen sind, die mit der Anwendung der Technologie bzw. der Durchführung des Prozesses verbunden sind. Das Verursachungsprinzip ist immer dann erfüllt, wenn sowohl Existenz als auch Größe des zuzuordnenden Flusses von der Realisierung der jeweils betrachteten Bezugsobjekte abhängen, wobei aus pragmatischen Gründen meist proportionale bzw. funktionale Beziehungen unterstellt werden.

Durch mehrere Verursacher gemeinsam bedingte Flüsse werden demnach auch nur dieser Gruppe von Verursachern zugeordnet und zunächst nicht weiter proportionalisiert. Entsprechend der Systematik in der Betriebswirtschaftslehre erfolgt eine Unterscheidung der Flüsse in "Einzelflüsse" und "Gemeinflüsse". Als Einzelflüsse werden solche Flüsse bezeichnet, die von einzelnen Verrechnungsobjekten verursacht werden und diesen direkt zurechenbar sind. Dagegen handelt es sich bei Gemeinflüssen um Flüsse, die gemeinsam für mehrere Verrechnungsobjekte anfallen und die einzelnen Verrechnungsobjekten nicht direkt, sondern nur unter Verwendung eines Verteilungsschlüssels zugeordnet werden können.<sup>1</sup> Während Einzelflüsse in jedem Fall vollständig zu erfassen sind, sollten Gemeinflüsse nur insoweit berücksichtigt werden, wie sie dem Bewertungsobjekt eindeutig zurechenbar und für die Entscheidungsfindung relevant sind. Auf eine Erfassung von Flüssen, die auf Kostenstellen-, Bereichs- oder Unternehmensebene anfallen und für die kein direkter kausaler Zusammenhang bzw. eine Mittel-Zweck-Beziehung bezogen auf das Prozeßergebnis besteht, wird daher verzichtet. Hinsichtlich des Erfassungsumfanges handelt es sich somit beim integrierten Rechnungswesen um eine Mischform aus Teil- und Vollrechnung (vergleichbar einer Teilkostenrechnung mit Vollkostencharakter in der Betriebswirtschaftslehre<sup>2</sup>).

Zur Unterstützung einer verursachungsgerechten Verrechnung der Flüsse, Umweltwirkungen und Kosten erfolgt die Erfassung der Flüsse differenziert nach den in Abb. 17 dargestellten Erfassungsebenen. Einzelflüsse einer höheren Erfassungsebene stellen dabei Gemeinflüsse bezüglich untergeordneten Ebenen dar und können bei Bedarf später auf diese verrechnet werden.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Vgl. Definition von Einzel-/Gemeinkosten bei [Warnecke 1993]. Bezugsgrößen für die Verrechnung sind z.B. Menge, Zeit oder Wert, wobei die Verteilung üblicherweise nach dem Durchschnittsprinzip und im Verhältnis zur Bezugsgröße erfolgt [Heinen 1991].

<sup>2</sup> Vgl. z.B. Fixkosten-Deckungsrechnung in [Heinen 1991]

<sup>3</sup> Anmerkung: Letztendlich ist die Einordnung eines Flusses als Einzel- oder Gemeinfluß eine Frage der Bezugsebene. Beispiel: Bezogen auf eine Produkteinheit handelt es sich bei einer Druckgießform um einen Gemeinfluß, da mit ihr eine größere Stückzahl hergestellt werden kann. Aus Sicht einer Produktgruppe stellt das Werkzeug jedoch einen Einzelfluß dar, der eindeutig einer bestimmten Produktart zugeordnet werden kann. Bei einer detaillierten und verursachungsgerechten Datenerfassung im Sinne dieser Arbeit würde das Werkzeug daher als Einzelfluß auf Produktartenebene erfaßt werden.

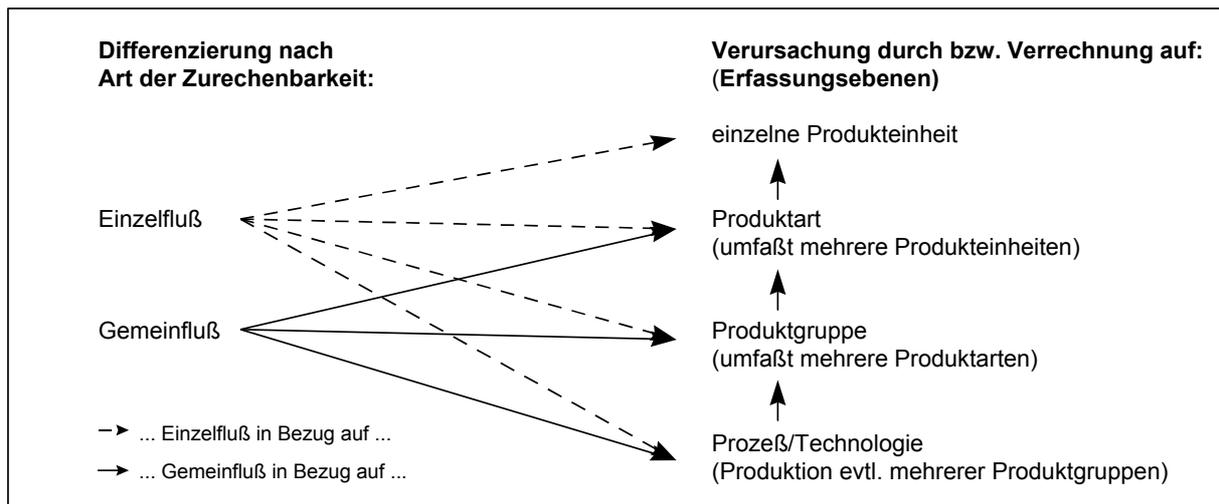


Abb. 17: Ambivalenz der Zurechenbarkeit von Flüssen in Abhängigkeit von der Erfassungsebene

### 6.2.3 Berücksichtigung der Reagibilität der Flüsse

Um die Realität möglichst verursachungsgerecht abbilden zu können und um eine detaillierte Analyse im Sinne eines taktisch orientierten Planungs- und Gestaltungsansatzes zu ermöglichen, sollten Struktur und Charakteristik der erfaßten Daten erhalten werden. Neben einer Differenzierung der Flüsse nach ihrer Zurechenbarkeit zu Verursachern und Trägern ist dabei insbesondere die Wiedergabe ihrer Reagibilität von entscheidender Bedeutung.<sup>1</sup>

In Anlehnung an das betriebliche Rechnungswesen werden daher fixe und variable Flüsse unterschieden. Fixe Flüsse sind demnach Flüsse, die unabhängig von der Inanspruchnahme eines Prozesses und in erster Linie zeitabhängig anfallen, während sich variable Flüsse linear, progressiv oder degressiv mit der Ausbringung bzw. Inanspruchnahme des Prozesses verändern.<sup>2</sup> Im Unterschied zur Betriebswirtschaftslehre wird jedoch eine Konzentration auf den Beschäftigungsgrad als einzige Variable abgelehnt, um eine unzulässige Proportionalisierungen zeitabhängiger Flüsse zu vermeiden. Statt dessen erfolgt eine mehrstufige Reagibilitätsbetrachtung nach den Kriterien Zeit und Ausbringung sowie fixem und variablem Verhalten (Abb. 18).

<sup>1</sup> Reagibilität bezeichnet die Abhängigkeit der quantitativen Ausprägung eines Flusses von anderen Bezugsgrößen und beschreibt, inwieweit eine Veränderung derselben eine Änderung der Flußgröße bewirkt. Zum Begriff der Reagibilität vgl. auch [Heinen 1991]

<sup>2</sup> vgl. Definition fixer und variabler Kosten in [Warnecke 1993b]

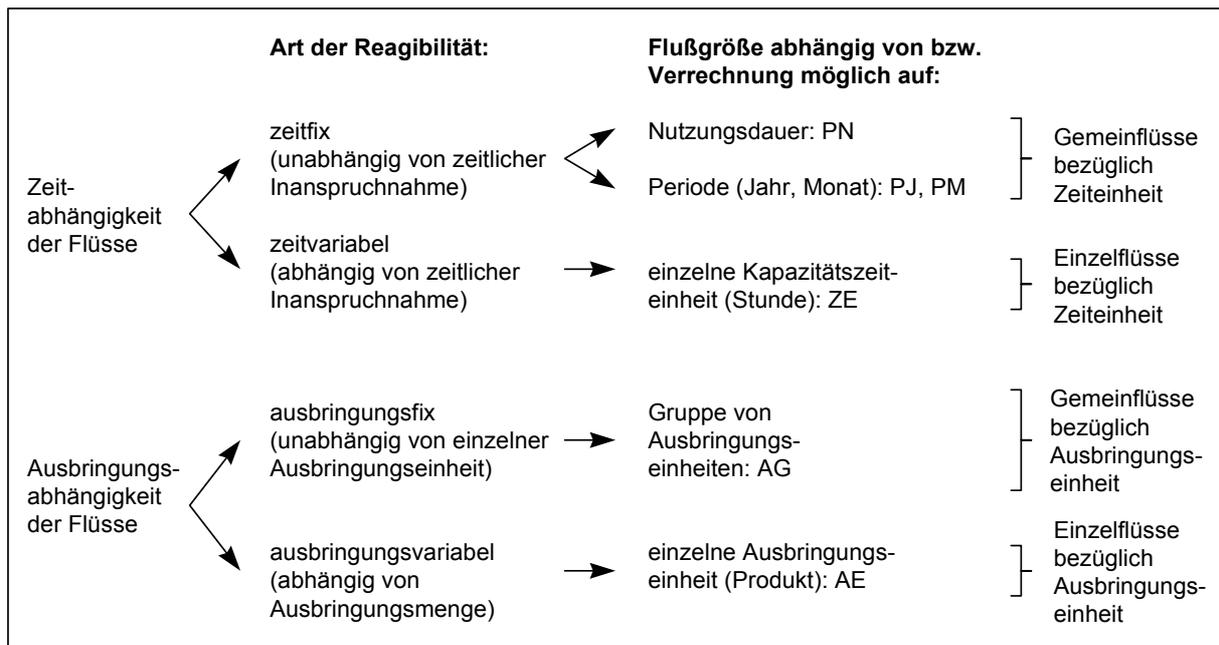


Abb. 18: Differenzierung der Flüsse nach ihrer Reagibilität

Bei zeitabhängigen Flüssen ist die quantitative Ausprägung weitgehend trägerunabhängig und im wesentlichen nur von ihrer zeitlichen Inanspruchnahme abhängig. Zeitfixe Flüsse fallen für eine Zeiteinheit an, die im Verhältnis zur Inanspruchnahme des Prozesses durch ein einzelnes Produkt relativ groß ist (z.B. gesamte Nutzungsdauer einer Investition oder eine Periode). Vielfach handelt es sich um Flüsse, die der Leistungsbereitschaft dienen. Zeitvariable Flüsse sind dagegen direkt proportional zur zeitlichen Inanspruchnahme durch den Prozeß und werden in der Regel auf eine Kapazitätszeiteinheit (z.B. eine Betriebsstunde) bezogen. Zeitabhängige Größen lassen sich Trägern in erster Linie über zeitliche Zusammenhänge und zeitliche Inanspruchnahme zurechnen. Durch die Berücksichtigung der Reagibilitätsgröße "Zeit" werden eine Investitionsrechnung und die Bildung einer allgemeinen Verrechnungsgröße im Rahmen einer späteren Auswertung unterstützt.

Als zweiter Parameter bei der Untersuchung der Reagibilität dient die Ausbringungsabhängigkeit der Flüsse, wobei die Differenzierung der Flüsse in Anlehnung an die Kostenspaltung beim Direct Costing erfolgt [Heinen 1991]. Bei ausbringungsfixen Flüssen ist die Flußgröße weitgehend unabhängig von der Ausbringungsmenge des Prozesses. Vor allem Flüsse, die der Erstellung und Aufrechterhaltung der Leistungsbereitschaft des Prozesses dienen und einer Produktart, -gruppe oder der Technologie als solches zuzurechnen sind, fallen in diese Kategorie. Sowohl ausbringungs- als auch zeitfixe Flüsse sind Gemeinflüsse, die den jeweils untergeordneten Erfassungsebenen über verschiedene Parameter zugerechnet werden können. Ausbringungsvariable Flüsse sind dagegen Flüsse, die bei der Leistungserstellung verbraucht werden bzw. entstehen und deren Größe direkt von der Ausbringungsmenge des Prozesses und der Art des Produktes abhängt. Bei Produktionsfaktoren, die in erster Linie nur gebraucht, aber nicht verbraucht werden, erfolgt gegebenenfalls eine Verminderung des Leistungspotentials durch Inanspruchnahme.

Als semivariabale Flüsse werden solche Flüsse bezeichnet, die zu einem gewissen Umfang sowohl zeit- als auch ausbringungsabhängig sind, z.B. Flüsse, die teils bei der Aufrechterhaltung des Prozesses im Zeitablauf und teils bei der Leistungserstellung selbst verzehrt werden. Aus pragmatischen Gründen sollte jedoch eine Zurechnung dieser Flüsse - der dominierenden Charakteristik entsprechend - entweder zu den fixen oder zu variablen Flüssen erfolgen. Die jeweils andere Reagibilitätsart kann gegebenenfalls durch passende Parameter berücksichtigt werden, die für den vorliegenden Bewertungsfall zu wählen sind.

Bei der Methode der Integrierten Bewertung erfolgt somit eine differenzierte Erfassung der Flüsse nach den Kriterien Erfassungsebene bzw. Zurechenbarkeit und Reagibilität. Auf diese Weise wird die Reagibilität der im Rahmen der Grundrechnung ermittelten Daten weitaus detaillierter wiedergegeben, als dies in der Betriebswirtschaftslehre mit einer Konzentration auf den Beschäftigungsgrad bzw. die Ausbringungsmenge üblich ist. Da in den Methoden des Umweltmanagements die Themen Zurechenbarkeit und Reagibilität bislang überhaupt nicht berücksichtigt wird, wird auf diese Weise auch auf diesem Gebiet ein Beitrag zur Weiterentwicklung der Systematik geleistet.

#### **6.2.4 Bezugsgrößen bei der Datenerfassung**

Um die Struktur und Charakteristik der Flüsse absolut verursachungsgerecht in der Grundrechnung abzubilden, müßten die Flußgrößen streng genommen nicht als feste Einzelwerte, sondern als Funktionen dargestellt werden. Da dies jedoch zu komplex und rechentechnisch kaum beherrschbar wäre, ist ein Kompromiß zwischen verursachungsgerechter Abbildung und Praktikabilität erforderlich, d.h. eine Komplexitätsreduktion bei der datenmäßigen Abbildung des zu bewertenden Prozesses. Ein üblicher Lösungsansatz ist daher die Erfassung der Daten unter bestimmten Randbedingungen und unter einem festen Blickwinkel.

Bei der Ökobilanzierung werden Sachbilanzdaten in der Regel auf eine Produkteinheit bzw. ein funktionales Äquivalent bezogen, wobei weder die Gemein- bzw. Einzelflußproblematik, noch die Reagibilität der Flüsse thematisiert werden. Die Ergebnisse sind daher ausschließlich für die gesetzten Randbedingungen gültig und nicht auf andere Produkte oder Produktionsbedingungen übertragbar. Bei einer Änderung der Randbedingungen, z.B. der produzierten Stückzahlen oder der Zusammensetzung des Produktspektrums, müssen die Daten daher neu erhoben werden.

In der Grundrechnung der Betriebswirtschaftslehre werden Kosten dagegen stets für eine Periode und nach Kostenstellen als dem Ort ihres Anfalls erfaßt. Hiermit verbunden ist ein Informationsverlust, da auf diese Weise weder Verursachung noch Reagibilität der Kosten abgebildet werden können. Hinzu kommt, daß sich die erfaßten Kosten auf ein bestimmtes Produktspektrum mit entsprechenden Produk-

tionszahlen der unterschiedlichen Produktarten beziehen, so daß Proportionalisierungs- und Verrechnungsfehler bei einer nachgeschalteten Kalkulation von Einzelprodukten systembedingt sind.

Mit der Konzeption der Grundrechnung der Methode der Integrierten Bewertung wird daher angestrebt, Verrechnungsfehler durch unkorrekte Proportionalisierungen im Rahmen der Auswertungsrechnung von vornherein zu vermeiden bzw. zu minimieren und zugleich ein Maximum an Aussagekraft und Entscheidungsunterstützung bei vertretbarem Aufwand zu erreichen. Anstelle der festen Vorgabe eines Bezugsrahmens, erfolgt die Erfassung der Grunddaten daher bewertungszielorientiert, wobei sich die Wahl der Bezugsgröße an der individuellen Bewertungsaufgabe orientiert. Für die in dieser Arbeit entwickelte Bewertungsmethode sind in erster Linie die folgenden drei, bereits beschriebenen Anwendungsgebiete relevant:

- Prozeß- bzw. Produktkalkulation (Bewertung der einmaligen Inanspruchnahme eines Prozesses zur Herstellung einer Produkteinheit)
- Investitionsbewertung (Bewertung des Gesamtnutzens einer Investition)
- Technologiebewertung (Ermittlung einer allgemeinen Vergleichsgröße)

Da bei einer Prozeß- bzw. Produktkalkulation die Umweltwirkungen und Kosten, die mit der einmaligen Durchführung eines Prozesses zur Herstellung eines Produktes verbunden sind, zu ermitteln sind, dient die einzelne Prozeßleistung als Bezugsgröße für die Datenermittlung. Zeitabhängige Größen sind auf die in Anspruch genommene Zeit für eine einmalige Prozeßdurchführung zu verrechnen, während für ausbringungsabhängige Größen die Inanspruchnahme prozeßbedingter Einzel- und Gemeinflüsse für die Herstellung einer Produkteinheit zu quantifizieren ist. Da es sich um die Bewertung eines spezifischen Produktes handelt, sind die Werte übergeordneter zurechenbarer Erfassungsstufen als Gemeinflüsse unter Verwendung von Schlüsselungsgrößen auf eine Einheit der betrachteten Produktart zu verrechnen.

Für eine Investitionsbewertung sind die Flüsse dagegen nicht auf eine einzelne Produkteinheit und die dafür in Anspruch genommene Zeit zu beziehen, sondern auf die gesamte Nutzungszeit der Investition und auf das hergestellte Produktspektrum. Als Bezugsgröße für die Datenermittlung dient dementsprechend der Lebenszyklus der Investition, wobei die Flüsse nach Perioden und für das gesamte Produktspektrum zu erfassen sind. Für eine detailliertere Analyse kann man die Nutzungszeit der Investition gegebenenfalls in die Phasen Einrichtung der Leistungsbereitschaft und Anlauf, Nutzung sowie Auslauf und Deinvestition am Nutzungszeitende untergliedern und diese dann separat untersuchen. Bei der Analyse der Nutzungsphase kann zudem nach Flüssen für die Aufrechterhaltung der Leistungsbereitschaft (in erster Linie handelt es sich hierbei um zeit- und ausbringungsfixe Flüsse) und solche für die eigentliche Leistungserstellung (v.a. zeit- und ausbringungsvariable Flüsse) differenziert werden.

Bei einer Technologiebewertung wird dagegen die Ermittlung einer allgemeinen Vergleichsgröße angestrebt, die als Funktion von Zeit und Ausbringung (Verrechnungssatz) zur Charakterisierung ei-

nes Prozesses und zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit des Einsatzes der untersuchten Technologie für zukünftige Produktionsaufgaben herangezogen werden kann. Gegebenenfalls können noch weitere Produkt- und Prozeßparameter, die für die quantitative Ausprägung eines Flusses entscheidend sind, als zusätzliche Variablen in den Verrechnungssatz aufgenommen werden. Aufgrund der angestrebten Universalität des Verrechnungssatzes beziehen sich die Flüsse somit nicht auf eine spezifische Prozeßleistung, sondern der Satz setzt sich, entsprechend der Reagibilität der Flüsse, aus mehreren Komponenten zusammen. Neben einer Zeitkomponente, für die alle zeitabhängigen Größen auf eine Kapazitätszeiteinheit bezogen werden, kann der Verrechnungssatz noch produktunabhängige sowie produktspezifische Komponenten zur Berücksichtigung ausbringungsabhängiger Flüsse enthalten. Eine zusätzliche Differenzierung zwischen Leistungsbereitschaft und Leistungserstellung als zusätzliches Kriterium ist zwar theoretisch denkbar, für die Praxis jedoch zu aufwendig. Da die Ermittlung eines absolut allgemeingültigen Verrechnungssatzes aus Komplexitätsgründen nicht praktikabel erscheint, müssen bestimmte Randbedingungen gesetzt und zumindest ein typisches Produktspektrum oder eine repräsentative Produktionsaufgabe zugrunde gelegt werden.

In Abb. 19 ist für die unterschiedlichen Bewertungszwecke zusammenfassend dargestellt, für welche Bezugsgrößen die zeit- und ausbringungsabhängigen Flüsse zu ermitteln sind.

<b>Bezugsgrößen für zeitabhängige Flüsse ...</b>					
<b>Zeitstufe</b>					
<b>Erfassungsstufe</b>	FZ	ZE	PM	PJ	PN
repräsentative Produkteinheit		<b>Technologiebewertung</b>			
Produkteinheit	<b>Produktkalkulation*</b>				
Produktionslos					
Produktart					
Produktgruppe					
Prozeß/Technologie			<b>Kostenrechnung (BWL)</b>		<b>Investitionsbewertung</b>

FZ Fertigungszeit                      PM Periode (Monat)                      PN Periode (Nutzungszeit)  
 ZE Zeiteinheit (Stunde)              PJ Periode (Jahr)

\* Eine Ökobilanz entspricht einer "ökologischen Produktkalkulation".

Abb. 19: Bewertungszielorientierte Wahl der Bezugsgrößen in der Grundrechnung

Die verursachungsgerechte und an der angestrebten Bewertungsaussage orientierte Zuweisung der nach Reagibilitätsstufen erfaßten Daten auf eine der im vorigen Kapitel genannten Bezugsgrößen stellt letztendlich eine Verrechnung der Ausgangsdaten auf diese Bezugsgröße dar. Diesen Schritt bereits im Rahmen der Grundrechnung durchzuführen, ergibt sich aus der Notwendigkeit, die Komplexität der Datenbasis zu minimieren und die Handhabbarkeit der nachfolgenden Rechenoperationen zu gewähr-

leisten. Denn anstelle einer Sammlung von Einzeldaten mit unterschiedlichen Bezügen oder anstatt komplexer Funktionen erhält man auf diese Weise ein systematisch und einfach aufgebautes Zwischenergebnis (siehe auch mathematische Modellierung in Kap. 6.5), das als Ausgangsbasis für die nachfolgende Berechnung der Bewertungs- und Ergebnisgrößen genutzt werden kann.

Ein entscheidender Vorteil dieser Vorgehensweise gegenüber bislang bekannten Methoden besteht darin, daß die Daten nach ihrer Erfassung auf dieselbe Bezugsgröße verrechnet werden, auf die sich auch die spätere Auswertungsrechnung bezieht. Mit der Orientierung der Datenerfassung am jeweiligen Bewertungsziel können spätere Verrechnungsfehler und unzulässige Proportionalisierungen vermieden werden. Die aus der Ökobilanzierung und Betriebswirtschaftslehre bekannten Probleme werden auf diese Weise umgangen und die Aussagekraft der Bewertung steigt.

### **6.2.5 Vorgehensweise und allgemeine Verrechnungsprinzipien bei der Datenerfassung**

Gemäß den obigen Ausführungen besteht der erste Schritt im Rahmen der Datenerfassung in der Wahl der Bezugsgröße und erfolgt in Abhängigkeit vom Ziel der Bewertung und der gewünschten Aussage (Abb. 20).

Unter Berücksichtigung der Abhängigkeit und Reagibilität bezüglich Zeit und Ausbringungsmenge erfolgt anschließend die Ermittlung der Grunddaten für die kausalen Erfassungsstufen Prozeß bzw. Technologie, Produktgruppe und Produktart und die zeitlichen Erfassungsstufen Nutzungsdauer, Periode und Kapazitätszeiteinheit. Der entscheidende Vorteil dieser differenzierten Erfassung liegt darin, daß die einmal erfaßte Datenbasis für unterschiedliche Bewertungszwecke herangezogen werden kann (s. Kap. 6.2.6 - 6.2.8). Änderung von Randbedingungen können leicht berücksichtigt werden, indem durch eine entsprechende Parametervariation die betroffenen zeit- bzw. ausbringungsabhängigen Flußgrößen einfach angepaßt werden. Bei herkömmlichen Bewertungsmethoden bzw. Rechnungssystemen, die nicht diese Detaillierung und Flexibilität bieten, müssen die Daten entweder unter hohem Aufwand gänzlich neu erhoben werden, da die ursprünglichen Größen nicht mehr verfügbar sind, oder es kommt zu Falschaussagen, wenn Daten unverändert für andere Bezugsgrößen oder Randbedingungen übernommen werden.

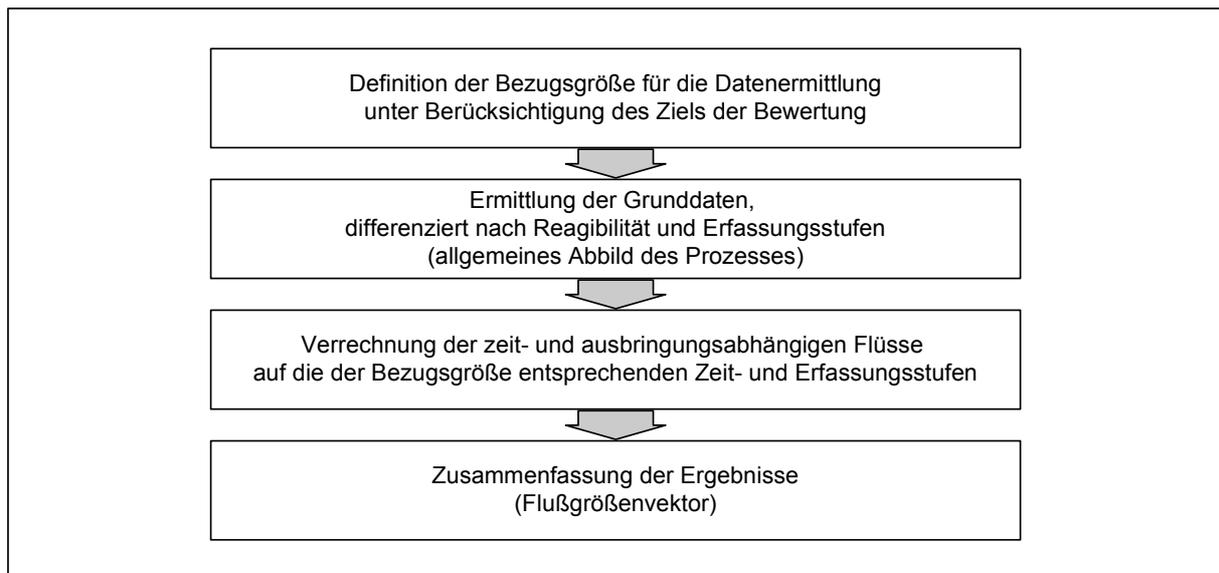


Abb. 20: Vorgehensweise zur bewertungszielorientierten Datenerfassung<sup>1</sup>

Um die Flußgrößen zu erhalten, erfolgt anschließend die verursachungsgerechte Verrechnung der Daten sowohl übergeordneter als auch untergeordneter Erfassungsstufen auf die gewählte Bezugsgröße. Dabei erfordert die Zurechnung von Gemeinanteilen für zeitabhängige und ausbringungsabhängige Größen unterschiedliche Regeln.

Die Verrechnung zeitabhängiger Gemeingrößen erfolgt in zwei Schritten und unter Zuhilfenahme zeitbezogener Verrechnungsschlüssel, wobei die verfügbare Kapazität (Zeit) den limitierenden Faktor darstellt. Zunächst sind die Werte übergeordneter Reagibilitätszeitstufen auf die angestrebte Zeitbezugsstufe zu verrechnen. Dies geschieht durch Division durch die Anzahl der in der Reagibilitätszeitstufe enthaltenen Zeitbezugsstufen, wobei nicht die theoretische Anzahl von Kapazitätszeiteinheiten, sondern die tatsächlich in Anspruch genommenen zugrunde zu legen sind (Abb. 21).<sup>2</sup> Auf diese Weise erhält man für jede der einzelnen trägerbezogenen Erfassungsstufen einen eigenen Verrechnungssatz. Die Ergebnisse dieses ersten Rechenschritts sind dann unter Berücksichtigung der zeitlichen Inanspruchnahme auf die angestrebte trägerorientierte Erfassungsbezugsebene zu verrechnen (z.B. Multiplikation eines Stundensatzes mit der Fertigungszeit für eine Produkteinheit). Bei rein zeitabhängigen Flüssen, d.h. bei Flüssen, die unabhängig von den gefertigten Produkten sind und keiner Erfassungsstufe zuzuordnen sind, ist dieser Rechenschritt nicht erforderlich.

<sup>1</sup> Eine Definition des Flußgrößenvektors erfolgt in Kap. 6.5, Mathematische Modellierung der Grundrechnung.

<sup>2</sup> Anmerkung: Wird anstelle der in Anspruch genommenen Kapazitätszeiteinheiten mit den theoretisch verfügbaren gerechnet, kommt es zu einer Unterdeckung.

<b>Allgemeines Verrechnungsprinzip zur Verrechnung zeitabhängiger Größen:</b>		
Verrechnung über die Anzahl der in der Zeiterfassungsstufe enthaltenen Zeitbezugsstufen		
PN ↔ PJ	Nutzungszeit in Jahren	
PJ ↔ PM	Anzahl der Nutzungsmonate pro Jahr	
PM ↔ ZE	tatsächlich genutzte monatliche Kapazität (in Stunden) = theoretische Kapazität pro Monat * Auslastungsgrad	
ZE ↔ FZ	Prozeßzeit zur Herstellung einer Produkteinheit = 1/Ausbringungsmenge pro Stunde bei Vollauslastung	
ZE Zeiteinheit (Stunde)	PM Periode (Monat)	PN Periode (Nutzungszeit)
FZ Fertigungszeit	PJ Periode (Jahr)	

Abb. 21: Verrechnung zeitabhängiger Größen zwischen den Reagibilitätszeitstufen

Bei ausbringungsabhängigen Größen dienen die Ausbringungsmenge bzw. die Inanspruchnahme des nutzbaren Potentials als Basis für die Verrechnung von Gemeingrößen. Dementsprechend kann eine Verrechnung auf die angestrebte Erfassungsebene mit Hilfe von Mengengrößen und verursachungsgerechten Äquivalenzfaktoren erfolgen (Abb. 22). Bei den Äquivalenzfaktoren handelt es sich um flußspezifische Größen, die sich aus Prozeß- oder Produktdaten ableiten lassen und die Inanspruchnahme des Prozesses bzw. die Reduktion des verfügbaren Potentials widerspiegeln.<sup>1</sup>

<b>Allgemeines Verrechnungsprinzip zur Verrechnung übergeordneter Gemeingrößen:</b>		
Anteil an Gemeingröße der Stufe i+1	= zu verrechnende Gemeingröße der Erfassungsstufe i+1 *	$\frac{\text{Äquivalenzfaktor} * \text{Ausbringungsmenge der Erfassungsstufe } i}{\text{Summe der Produkte (Äquivalenzfaktor} * \text{Ausbringungsmenge) für alle Träger der Erfassungsstufe } i}$

Abb. 22: Verrechnung übergeordneter Gemeingrößen bei ausbringungsabhängigen Flüssen

Für die unterschiedlichen Ausprägungsformen der Methode der Integrierten Bewertung wird in den folgenden Kapiteln detaillierter auf die Verrechnungsregeln eingegangen, nach denen die Flußgrößen aus der einmal gewonnenen prozeßbeschreibenden Datenbasis abgeleitet werden können.

<sup>1</sup> Beispiele für Äquivalenzfaktoren: Gießgewicht (für Schmelzenergie), Schußzahl (für Werkzeugstandzeit), Zerspanvolumen (für Werkzeugverschleiß), Schweißnahtlänge (für Gasverbrauch)

## 6.2.6 Verrechnung im Rahmen einer Prozeß- bzw. Produktkalkulation

Ziel der Datenermittlung im Rahmen der Prozeß- bzw. Produktkalkulation ist die Ermittlung der Flußgrößen für die einmalige Inanspruchnahme des Prozesses zur Herstellung einer Produkteinheit. Die nach ihrer Reagibilität erfaßten Daten sind dabei wie folgt auf die Bezugsgröße Produkteinheit zu verrechnen (Abb. 23):

Ausbringungsabhängige Flüsse werden stufenweise auf eine Einheit der gewählten Produktart verrechnet, um den Einfluß des Produktspektrums mit einzubeziehen (Schritt 1 in Abb. 23). Zeitabhängige Flüsse werden für die einzelnen Erfassungsebenen zunächst auf eine Kapazitätszeiteinheit (i.d.R. eine Stunde) verrechnet (Schritt 2). Für die Produkteinheit werden diese erhaltenen Stundensätze zu einem produktspezifischen Gesamtstundensatz aufsummiert (Schritt 3), und dieser mit der für die Herstellung einer Produkteinheit benötigten Fertigungszeit multipliziert (Schritt 4). Die Addition der verrechneten ausbringungs- und zeitabhängigen Größen ergibt dann die Flußgröße für eine Produkteinheit (Schritt 5). Das Ergebnis der Flußartenrechnung für den betrachteten Prozeß ergibt sich dann aus der Zusammenfassung aller durch die Herstellung einer Produkteinheit verursachten Flüsse.

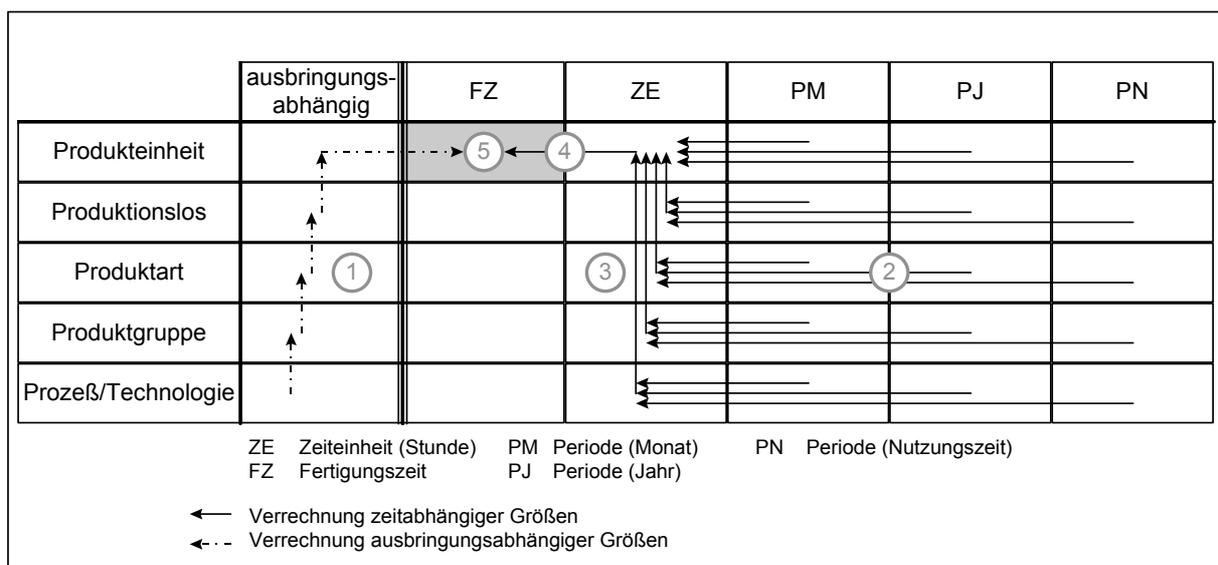


Abb. 23: Verrechnung im Rahmen einer Prozeß- bzw. Produktkalkulation

## 6.2.7 Verrechnung im Rahmen einer Investitionsbewertung

Bei einer Investitionsbewertung erfolgt eine Aggregation der nach ihrer Reagibilität erfaßten Flußgrößen über das gesamte Produktspektrum und für die Nutzungsdauer der Investition. Bestehen zwischen den einzelnen Perioden (i.d.R. ein Monat oder ein Jahr) größere Schwankungen, so wird der Flußgrößen-

Benvektor der Nutzungszeit aus der Summe der Flußvektoren der Einzelperioden gebildet, um eine zu starke Mittelung zu vermeiden.

Zur Ermittlung der jeweiligen Periodenergebnisse werden die zu verrechnenden Flußgrößen zunächst den einzelnen Perioden ihres Anfalls zugewiesen (z.B. einzelnen Monaten oder Jahren) und dann gemäß dem in Abb. 24 dargestellten Schema verrechnet: Zunächst werden wieder die ausbringungsabhängigen Flüsse stufenweise auf eine Einheit der verschiedenen Produktarten verrechnet (Schritt 1 in Abb. 24) und anschließend durch eine Multiplikation mit der jeweiligen Anzahl der in der zu betrachtenden Periode hergestellten Produkteinheiten auf die zeitliche Bezugsgröße verrechnet (Schritt 2). Zeitabhängige Größen werden für die einzelnen Erfassungsebenen über die Anzahl der in Anspruch genommenen Reagibilitätszeitstufen auf die gewünschte zeitliche Bezugsstufe verrechnet (Schritt 3). Da bei einer Periodenbetrachtung das gesamte Produktspektrum und damit sämtliche dem Prozeß bzw. der Technologie zuzurechnende Flüsse zu berücksichtigen sind, werden die einzelnen, mit der jeweiligen Ausbringungsmenge multiplizierten Periodensätze (Schritt 4) abschließend zum Periodenergebnis aufsummiert (Schritt 5).

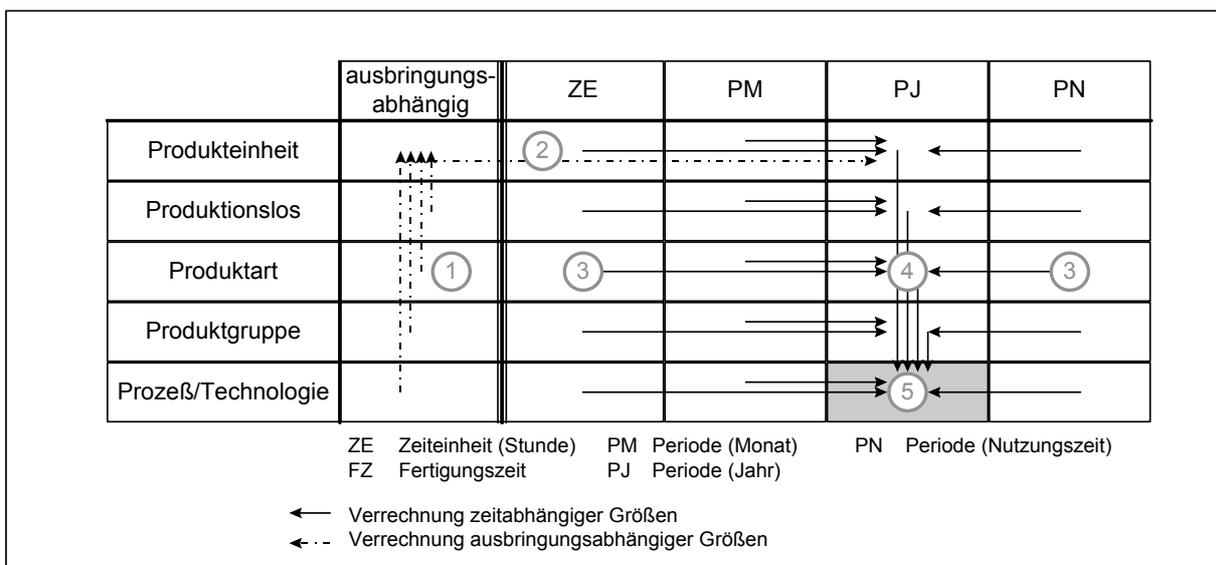


Abb. 24: Ermittlung eines Periodenergebnisses im Rahmen einer Investitionsbewertung

Das Ergebnis für die gesamte Nutzungszeit der Investition entspricht der Summe der Ergebnisse der Einzelperioden. Bei einer homogenen Verteilung der Produktionsleistung über die Perioden kann der Zwischenschritt der Verrechnung auf die einzelnen Perioden entfallen und statt dessen können die Flußgrößen direkt auf die Nutzungsdauer aggregiert werden (Schritt 3 in Abb. 25).

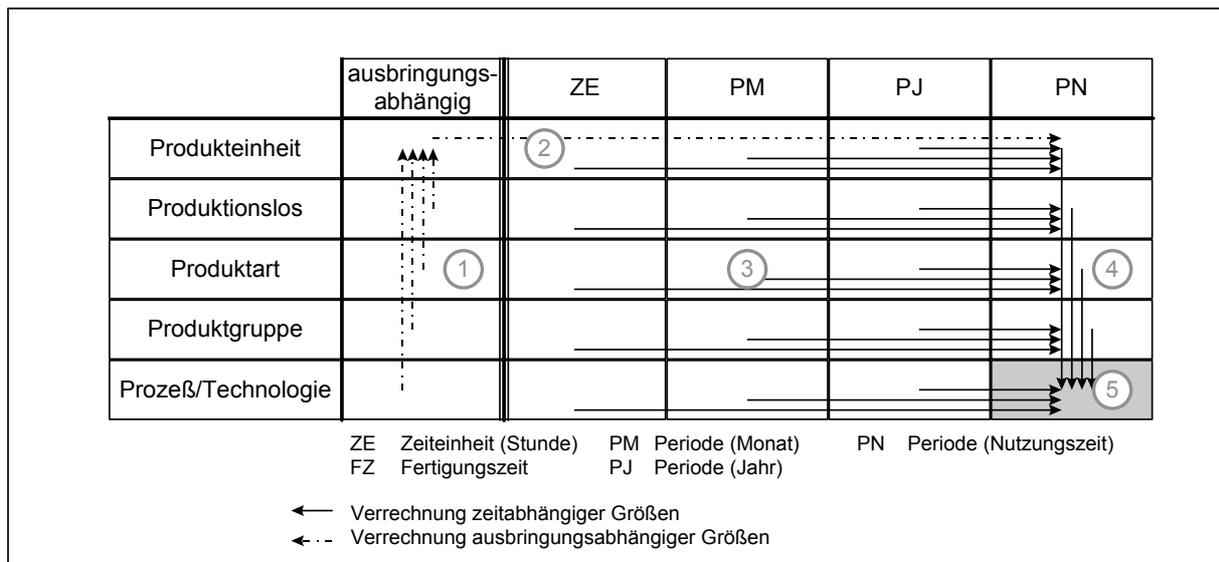


Abb. 25: Verrechnung im Rahmen einer Investitionsbewertung

### 6.2.8 Verrechnung im Rahmen einer Technologiebewertung

Für eine Technologiebewertung wird mit dieser Arbeit ein allgemeiner Prozeßsatz als universelle Größe vorgestellt, die auch für allgemeine Kalkulations- und Bewertungsaufgaben im Rahmen der taktischen Produktionsplanung geeignet ist. Durch Einsetzen spezifischer Produkt-, Produktionsaufgaben- und Prozeßparameter lassen sich dann die durch eine Inanspruchnahme des Prozesses verursachten Flußgrößen errechnen.

Zur Ermittlung des Prozeßsatzes erfolgt eine Verrechnung der Grunddaten gemäß ihrer Reagibilität und Zurechenbarkeit derart, daß die Abhängigkeiten von Zeit-, Ausbringungs- und Produktgrößen verursachungsgerecht wiedergegeben werden. Dementsprechend besteht der Satz aus einer ausbringungsabhängigen und einer zeitabhängigen Komponente, wobei es sich bei den einzelnen Flußgrößen gegebenenfalls um parametrisierte Werte handeln kann.

Die ausbringungsabhängige Komponente enthält zum einen eine ausbringungsabhängige Einzelflußkomponente, die bei Vorgabe entsprechender Prozeß- und Produktparameter die für eine Ausbringungseinheit zu erwartenden Flußgrößen ergibt. (Z.B. Beschreibung der Materialeinsatzmenge in Abhängigkeit von den Produktparametern Fertigteilgewicht und anteiliger Bearbeitungszugabe.) Eine ausbringungsabhängige Gemeinflußkomponente umfaßt zudem Anteile an Gemeinflüssen übergeordneter Erfassungsstufen in Abhängigkeit von Parametern, die das Produktspektrum bzw. die Produktionsaufgabe beschreiben. Wenn das zugrunde gelegte Produktspektrum repräsentativ ist, dann kann die ausbringungsabhängige Komponente als "produktneutral" aufgefaßt werden. Als Bezugsgröße für die Verrechnung ausbringungsabhängiger Größen dient eine parametrisierte allgemeine Produkteinheit,

ein prozeßspezifisches Äquivalent (z.B. Im Schweißnaht, 1cm<sup>3</sup> Zerspanvolumen) oder eine fiktive, aus einem Planproduktspektrum abgeleitete repräsentative Produkteinheit.

Die zeitabhängige Komponente wird als Kapazitätszeitkomponente bezeichnet und ergibt sich aus der Verrechnung zeitabhängiger Größen auf eine Kapazitätszeiteinheit als Bezugsgröße (üblicherweise 1 Stunde in Anspruch genommene Kapazität). Neben Größen, die direkt einer Zeiteinheit zugerechnet werden können, sind auch parametrisierte zeitabhängige Gemeingrößenanteile des zugrunde gelegten Produktspektrums bzw. der Produktionsaufgabe enthalten. Die Verrechnung basiert in der Regel auf Planwerten und setzt voraus, daß das Produktspektrum, für das Gemeinflußebene zeitabhängige Gemeinflüsse erfaßt werden, repräsentativ ist.

Die Bestimmung der genannten Komponenten eines allgemeinen Prozeßsatzes erfolgt nach dem in Abb. 26 dargestellten Ablauf: Zunächst werden die ausbringungsabhängigen Gemeingrößen analog zu der in Kap. 6.2.6 beschriebenen Vorgehensweise auf die einzelnen Produkteinheiten verrechnet und zu den parametrisierten Einzelgrößen addiert (Schritt 1). Gegebenenfalls ist noch eine Verrechnung auf eine (fiktive) repräsentative Produkteinheit oder ein prozeßspezifisches Äquivalent erforderlich, z.B. durch Multiplikation der auf eine Produkteinheit bezogenen Werte mit dem prozentualen Anteil der Produktart an der Gesamtausbringungsmenge des Produktspektrums und eine Aufsummierung der auf diese Weise erhaltenen anteiligen Werte (Schritt 2). Die Verrechnung zeitabhängiger Größen erfolgt analog zur Vorgehensweise bei der Prozeß- bzw. Produktkalkulation (Schritte 3-5).

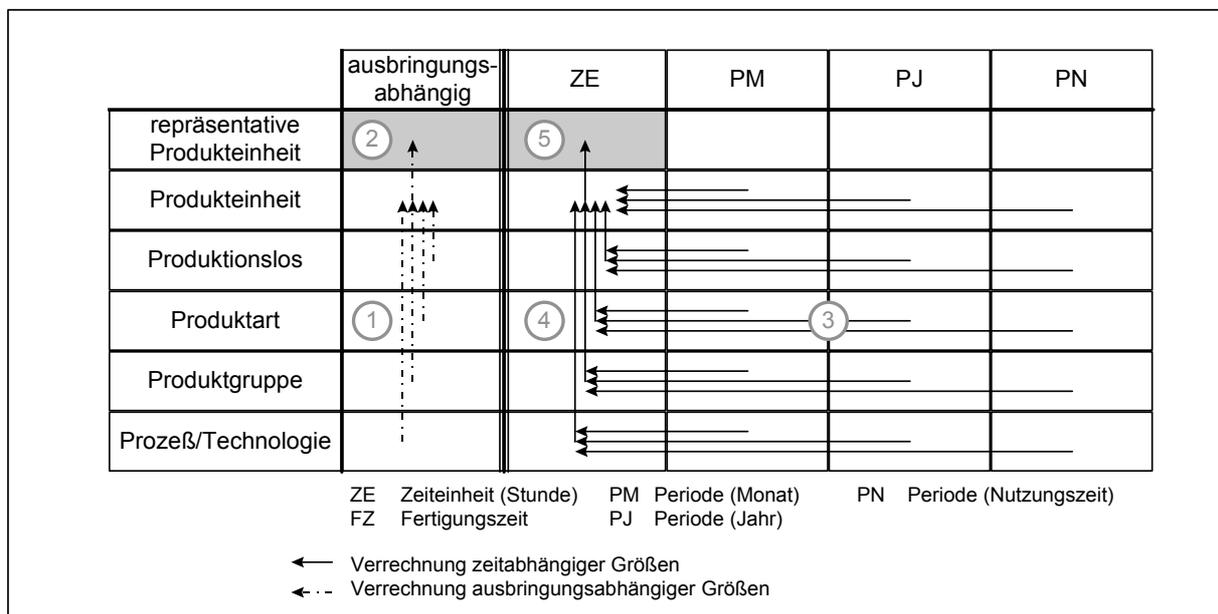


Abb. 26: Verrechnung im Rahmen einer Technologiebewertung zur Ermittlung eines allgemeinen Prozeßsatzes

Die ausbringungs- und zeitabhängigen Komponenten des Ergebnisses der Flußartenrechnung ermöglichen eine detaillierte Wiedergabe der Reagibilität der Flüsse, insbesondere wenn Einflußfaktoren, die

die quantitative Ausprägung des Flusses bestimmen, in Form von Parametern wiedergegeben werden. Beim Prozeßsatz handelt es sich somit um eine universelle Größe, die durch Einsetzen bzw. Verändern der Parameter für unterschiedliche Bewertungsaufgaben eingesetzt werden kann.

An dieser Stelle wird auch noch einmal der Vorteil der gemeinsamen prozeßbeschreibenden Datenbasis deutlich. Änderung der Parameter brauchen nur einmal auf der Flußgrößenebene durchgeführt zu werden und wirken sich dann automatisch auf die Bewertungsgrößen der Umweltwirkungen und Kosten aus, da deren Berechnung direkt auf den Ergebnissen der Grundrechnung aufbaut.

### **6.3 Umweltwirkungsartenrechnung der Methode der Integrierten Bewertung**

Die Umweltwirkungsartenrechnung setzt auf den Ergebnissen der Flußartenrechnung auf und ist Bestandteil der Grundrechnung (Abb. 27). Sie dient der Berechnung der mit den Flüssen verbundenen Umweltwirkungen (s. Kap. 3.1.2)

- Treibhauspotential ( $GWP_{100}$ ),
- Ozonzerstörungspotential (ODP),
- Versauerungspotential (AP),
- Eutrophierungspotential (EP),
- Ökologisches Effektpotential (EEPF),
- Energie- und Energieträgereinsatz,
- Materialeinsatz,
- Wassereinsatz und
- Abfallmenge.

Die formale Berechnung der Bewertungsgrößen (Wirkungsindikatorergebnisse) wurde bereits in Kap. 5.3 erläutert, so daß an dieser Stelle eine Operationalisierung der Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien im Vordergrund steht. Prinzipiell ist eine Differenzierung der Umweltwirkungsarten hinsichtlich ihrer Zurechenbarkeit und Reagibilität in Einzel- und Gemein- sowie fixen und variablen Umweltwirkungen möglich. Da die Eingangswerte der Umweltwirkungsartenrechnung jedoch bereits als verrechnete Flußgrößen vorliegen, ist dies nicht erforderlich und - um die Komplexität zu begrenzen - auch nicht sinnvoll.

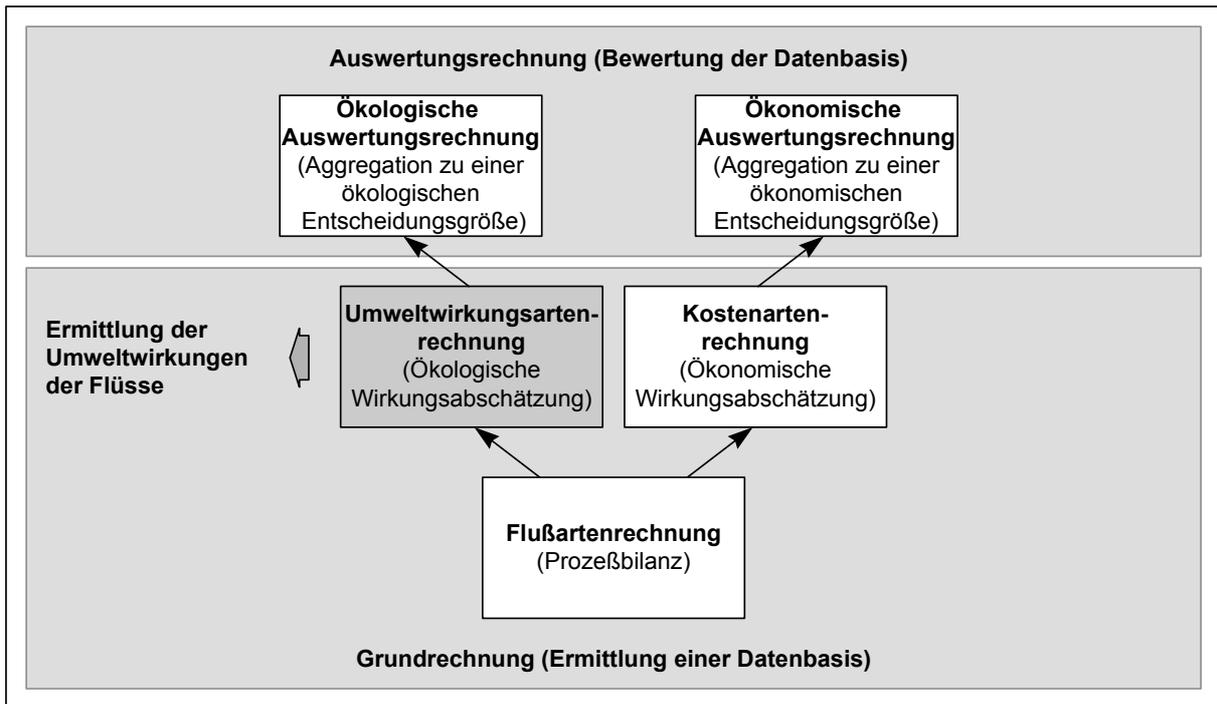


Abb. 27: Aufgabe der Umweltwirkungsartenrechnung im Integrierten Rechnungswesen

Von entscheidender Bedeutung für die Abschätzung und Bewertung von Umweltwirkungen ist die Definition eines geeigneten Untersuchungsrahmens, da hierdurch festgelegt wird, in welchem Umfang Umweltwirkungen in die Bewertung einbezogen werden. Bei den Methoden des Umweltmanagements entspricht der Untersuchungsrahmen üblicherweise dem Bilanzierungsrahmen der Sachbilanz und orientiert sich in erster Linie an der Art des Ökobilanzierungsansatzes (Abb. 28).

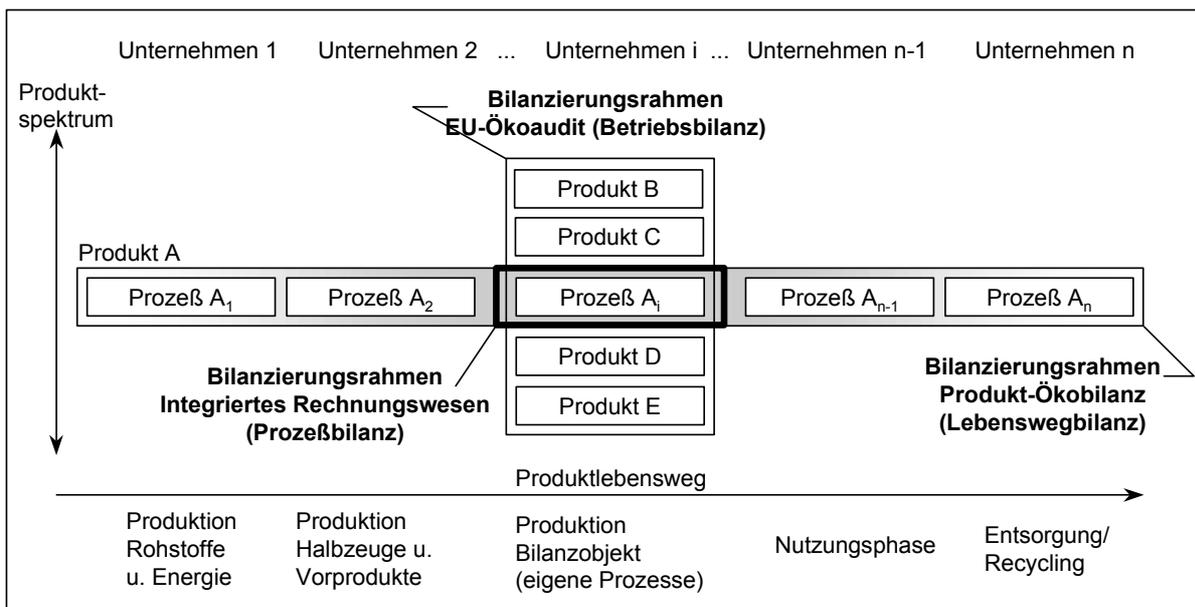


Abb. 28: Bilanzierungsrahmen der unterschiedlichen Bilanzarten [Schultz 1997]

Da die Umweltwirkungsartenrechnung des Integrierten Rechnungswesens auf der Flußartenrechnung aufbaut, ist der Bilanzierungsrahmen bereits festgelegt und - aufgrund des angewandten Verursachungsprinzips - auf dem Prozeß zurechenbare und von ihm beeinflusste Flüsse beschränkt. Unter Berücksichtigung des Ermittlungsaufwands und der Einflußmöglichkeiten einerseits und der Logik des Integrierten Rechnungswesens andererseits wäre es daher aus pragmatischen Gründen wünschenswert, die gesamte Grundrechnung auf den im Mittelpunkt des Erkenntnisinteresses stehenden Einzelprozeß zu begrenzen. Denn mit zunehmender Entfernung von den eigenen Prozessen eines Unternehmens steigt der Aufwand für die Datenermittlung überproportional an, während die Möglichkeit der Einflußnahme auf die zum Einsatz kommenden Prozesse, Art und Größe der Flüsse sowie die damit verbundenen Umweltwirkungen stark abnimmt (Abb. 29).

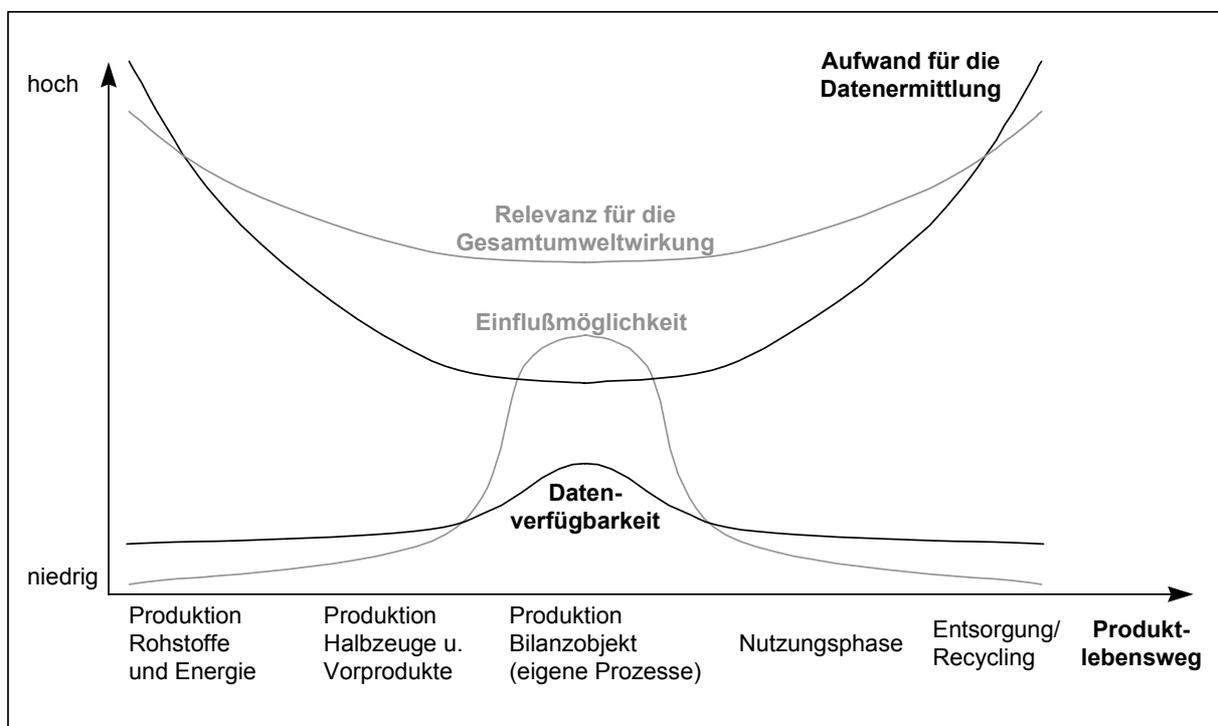


Abb. 29: Dilemma der Datenverfügbarkeit und -relevanz [Schultz 1997]

Häufig stellen die mit den In- und Outputflüssen des Unternehmens direkt verknüpften Auswirkungen nur einen Teil der insgesamt verursachten Umweltwirkungen dar, so daß auch eine Betrachtung der vor- und nachgelagerten Prozeßschritte im Lebensweg der In- und Output-Flüsse erforderlich ist. Es besteht daher die Notwendigkeit, den Untersuchungsrahmen über die Bilanz- und Systemgrenzen des untersuchten Prozesses auszudehnen und so zu wählen, daß alle wesentlichen vom Unternehmen di-

rekt und indirekt verursachten und beeinflussbaren Umweltwirkungen berücksichtigt werden können (Problematik des "ökologischen Rucksacks")<sup>1</sup>.

Einen Lösungsansatz für dieses Dilemma bietet das Konzept des Integrierten Rechnungswesens mit der Unterteilung in Flußartenrechnung und Umweltwirkungsartenrechnung, denn es gestattet es, den Umfang der Flußartenrechnung formal auf den zu untersuchenden Prozeß zu begrenzen und nur die direkten In- und Outputflüsse zu erfassen. Die Umweltwirkungen der von diesen Flüsse induzierten vor- und nachgelagerten unternehmensinternen und -externen Flüsse und Prozesse können dagegen in der Umweltwirkungsartenrechnung berücksichtigt werden, indem eine Multiplikation mit entsprechenden Charakterisierungsfaktoren erfolgt, die den "ökologischen Rucksack" der einzelnen Flüsse repräsentieren. Im Gegensatz zur DIN EN ISO 14041 entfällt damit die Notwendigkeit einer Ausdehnung des Prozeßmodells der Bewertung bis auf die Ebene von Elementarflüssen, da die Charakterisierungsfaktoren nicht mehr nur die Auswirkungen von Elementarflüssen beschreiben, sondern auch für die Umweltwirkungen ganzer Prozeßketten stehen können.

Auf diese Weise ist es möglich, den Bilanzierungsrahmen der Flußartenrechnung vom Untersuchungsrahmen der Wirkungsartenrechnung zu entkoppeln. Die Flußartenrechnung kann formal auf die Grenzen des zu bewertenden Prozesses und die damit verbundenen Flüsse beschränkt werden, während in der Umweltwirkungsartenrechnung gegebenenfalls die gesamten Lebenswege aller In- und Outputs in die Bewertung einbezogen werden können (Tab. 13). Um die Umweltwirkungen vor- und nachgelagerter Prozesse berücksichtigen zu können, sind zweifelsohne entsprechende Datenbanken bzw. Hilfsrechnungen zur Ermittlung entsprechender Charakterisierungsfaktoren erforderlich. In Anbetracht einer zunehmenden Verbreitung der Methode der Ökobilanzierung und einer damit verbundenen höheren Datenverfügbarkeit ist diese Voraussetzung jedoch realisierbar.<sup>2</sup> Mit diesem Ansatz, Ökobilanzergebnisse zur Ableitung entsprechender Charakterisierungsfaktoren zu verwenden und damit den Bilanzierungsumfang und -aufwand zu begrenzen, wird zugleich ein Beitrag zur Weiterentwicklung der bekannten Methoden des Umweltmanagements geleistet.

---

<sup>1</sup> Unter dem "ökologischen Rucksack" werden im allgemeinen diejenigen Umweltwirkungen verstanden, die von einem Fluß in vorgelagerten Prozeßketten verursacht werden, bevor er dem zu bewertenden Prozeß als Input zugeführt wird.

Beispiel: In einem Prozeß eingesetztes Rohmaterial stellt nicht nur einen Ressourcenverbrauch dar, sondern hat in den vorgelagerten Prozessen seiner Erzeugung weitere Ressourcen- und Energieverbräuche sowie Emissionen verursacht. Die damit verbundenen Umweltwirkungen sind dem untersuchten Prozeß zuzurechnen, da sie indirekt durch den Rohmaterialeinsatz verursacht werden. Entsprechendes gilt für Outputs, die nicht direkt in die Umwelt entlassen werden, sondern in nachgelagerten Prozessen zunächst aufbereitet werden. (Z.B. Abwasserreinigung, die Energieverbrauch und zu entsorgenden Klärschlamm verursacht.)

<sup>2</sup> Beim Verband der deutschen Automobilindustrie (VDA) befindet sich z.B. eine Datenbank im Aufbau, in der die detaillierte Materialzusammensetzung aller in der Automobilindustrie durch Zulieferunternehmen produzierten Bauteile und Komponenten hinterlegt werden. Durch eine entsprechende Multiplikation dieser Werte mit Ökobilanzergebnissen der Werkstoffe und Fertigungsprozesse ergeben sich die jeweiligen Charakterisierungsfaktoren für diese Bauteile. Darüber hinaus sind erste Tendenzen erkennbar, Zulieferer auch dazu zu verpflichten, Daten über interne Prozesse zu ermitteln, wie eine Initiative von Ford und General Motors zeigt, die von allen Zulieferern bis zum Jahr 2003 eine Zertifizierung nach DIN EN ISO 14001 fordern [Poppe, 2001].

<b>Art des Flusses</b>	<b>Art und mögliche Quelle der Charakterisierungsfaktoren</b>
Elementarfluß aus der / in die Umwelt	Datenbanken mit Charakterisierungsfaktoren für die meisten umweltrelevanten Stoffe sind vorhanden (z.B. Ökobilanz-Software; Literatur).
Produkt vorgelagerter Prozesse	Ableitung entsprechender Charakterisierungsfaktoren aus Wirkungsindikatorergebnissen von Ökobilanzen der entsprechenden Produkte vorgelagerter Prozesse (z.B. Produktion von Rohmaterial und Vorprodukten).
An nachgelagerte Prozesse abgegebener Fluß	Ableitung entsprechender Charakterisierungsfaktoren aus Wirkungsindikatorergebnissen von Ökobilanzen der entsprechenden nachgelagerten Prozesse (z.B. Reinigungs- und Aufbereitungsprozesse).
Energie/ Energieträger	Der Energieverbrauch stellt bereits eine aussagekräftige Bewertungsgröße dar. Auf eine Multiplikation mit bei der Energieerzeugung entstehenden Emissionen und deren Wirkungen kann ggf. verzichtet werden, um die Aussagekraft direkter, prozeßbedingter Umweltwirkungen nicht zu stark zu überlagern.

Tab. 13: Charakterisierungsfaktoren für unterschiedliche Flüsse

Bei der hier vorgestellten Konzeption des Integrierten Rechnungssystems handelt es sich für den ökologischen Teil der Grundrechnung um eine verursachungsgerechte Vollverrechnung sämtlicher Umweltwirkungen auf den zu bewertenden Prozeß. Das Ergebnis stellt eine Verdichtung und Umwandlung der Vielzahl unterschiedlicher Flußarten in eine begrenzte Anzahl von Umweltwirkungsarten dar. Die ermittelten Wirkungsindikatorergebnisse dienen ihrerseits als Eingangsgrößen für eine weitere Aggregation im Rahmen der in Kap. 7 beschriebenen Auswertungsrechnung.

#### **6.4 Kostenartenrechnung der Methode der Integrierten Bewertung**

Aufgabe der Kostenartenrechnung im Rahmen des Integrierten Rechnungswesens ist die verursachungsgerechte Ermittlung sämtlicher dem Produktionsprozeß bzw. der Technologie zurechenbarer Kosten (Abb. 30). Die monetäre Bewertung der Ergebnisse der Flußartenrechnung erfolgt unter Differenzierung der in Kap. 5.2 beschriebenen Kostenarten, die zur Bewertung der Produkte eines Prozesses um die zusätzliche "Kostenart" Produkterlöse ergänzt werden:

- Fertigungsmaterialkosten
- Personalkosten
- Betriebsmittel- und Sachkosten<sup>1</sup>
- Kapital- und kalkulatorische Kosten
- Kosten empfangener Dienstleistungen
- Steuern, Gebühren und sonstige Kosten sowie
- Produkterlöse.

---

<sup>1</sup> Betriebsmittel- und Sachkosten: z.B. Kosten für Hilfs- und Betriebsstoffe, Energie und Entsorgung.

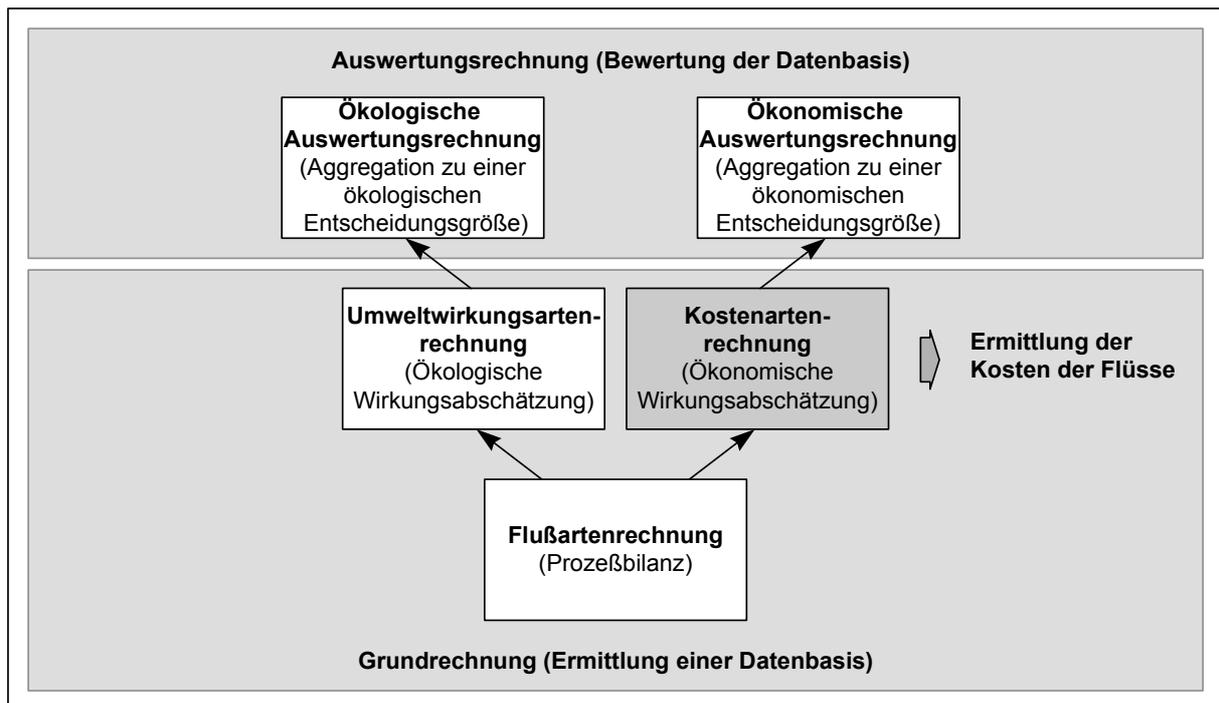


Abb. 30: Aufgabe der Kostenartenrechnung im Integrierten Rechnungswesen

Nach Kap. 5.3 ergeben sich Kosten aus der Multiplikation der Flußgrößen mit entsprechenden Verrechnungspreisen (Tab. 14), wobei Erlöse formal-mathematisch als "negative Kosten" aufgefaßt und wie die übrigen Kostenarten verrechnet werden (z.B. Erlöse aus dem Verkauf von Reststoffen).

Art des Flusses	Art und Quelle der Verrechnungspreise
Am Markt bezogene Güter und Dienstleistungen	Beschaffungspreise
Produkte aus vorgelagerten unternehmensinternen Prozessen	Interne Verrechnungspreise aus der betrieblichen Leistungsverrechnung
An unternehmensinterne Prozesse abgegebene Produkte	Interne Verrechnungspreise aus der betrieblichen Leistungsverrechnung
An den Markt abgegebene Nicht-Produktflüsse	Verkaufserlöse (z.B. für Güter zur Verwertung) bzw. Marktpreise (z.B. für Abfälle zur Entsorgung)
Kalkulatorische Kosten	Faktor zur Berücksichtigung entgangener kalkulatorischer Gewinne, z.B. kalkulatorische Zinsen infolge Kapitalbindung (Berücksichtigung als Periodenkosten)

Tab. 14: Verrechnungspreise<sup>1</sup>

Produkterlöse sind allerdings in der Mehrzahl der Bewertungsfälle nicht relevant, da der betrachtete Prozeß häufig nur einen Ausschnitt einer mehrstufigen Produktionskette darstellt, bei dem keine verkaufsfähigen Einheiten entstehen, und da in der Regel keine betriebsinternen Verrechnungspreise für diese Zwischenprodukte existieren [Rollberg 2001].

<sup>1</sup> Die Bezugseinheit der Verrechnungspreise muß der der Flußgrößen entsprechen: Z.B. DM/kg bei Flüssen, die in kg angegeben sind.

Bei der Festlegung von Verrechnungsumfang, Unterscheidung und Zurechnungsweise der Kosten besteht eine enge Korrelation zu der Bestimmung einer geeigneten Ausprägungsform der Kostenrechnung.<sup>1</sup> Vom zeitlichen Bezug her bietet sich für Aufgaben im Rahmen der taktischen Produktionsplanung ein Plankostensystem an, da in der Regel mit Prognose- und Durchschnittswerten für die zu erwartenden Kosten gerechnet wird. Klassische Vollkostenrechnungssysteme, bei denen sämtliche im Unternehmen anfallende fixe und variable Einzel- und Gemeinkosten erfaßt und auf Kostenträger verrechnet werden, sind als wenig geeignet und prinzipiell abzulehnen. Der Grund liegt in der nicht nachvollziehbaren Proportionalisierung fixer Komponenten, der Verwendung pauschaler Zuschlagsätze und der Verrechnung von Kosten, die nicht ursächlich mit der Leistungserstellung in Verbindung gebracht werden können (s. Kap. 3.2). Dagegen entsprechen Teilkostenrechnungssysteme grundsätzlich besser dem in Kap. 6.2.1 gewählten Verursachungsprinzip, da auf eine meist willkürliche Schlüsselung und Weiterverrechnung von Fix- und Gemeinkosten verzichtet wird. Eine ausschließliche Konzentration auf variable Kosten wäre jedoch aufgrund ihres relativ geringeren Anteils an den Gesamtkosten nicht aussagekräftig genug und könnte zu falschen Aussagen führen. Eine reine Teilkostenrechnung ist daher zur Bewertung von Prozessen und Technologien ebenfalls wenig geeignet.

In Hinblick auf die Bewertungsaufgabe und die Langfristwirkung der zu treffenden Entscheidungen ist daher eine Kostenrechnung mit Vollkostencharakter anzustreben, die aus einer Modifikation bzw. Weiterentwicklung herkömmlicher Teilkostenrechnungssysteme hervorgeht und eine umfassende prozeßorientierte und verursachungsgerechte Kostenerfassung und -verrechnung ermöglicht. Fix- und Gemeinkosten sollten dabei insoweit berücksichtigt werden, wie sie dem zugrunde gelegten Produktspektrum bzw. zu bewertenden Prozeß tatsächlich zugerechnet werden können und durch die Produktionstechnologie bzw. den installierten Prozeß beeinflußt werden, zumindest aber insoweit, wie bei einem Verfahrensvergleich Kostenunterschiede festgestellt werden können. Übergeordnete Gemeinkosten der Kostenstelle, des Bereichs oder des Gesamtunternehmens werden demnach nicht berücksichtigt. Da diese Prämissen in Einklang mit dem Erfassungsumfang und Verrechnungsumfang der Flußartenrechnung stehen, ist der Ansatz, die Kostenartenrechnung direkt auf der Flußartenrechnung aufbauen zu lassen, auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht gerechtfertigt.

Für eine verursachungsgerechte ökonomische Bewertung von Produktionsprozessen im Sinne dieser Arbeit wird letztendlich eine modifizierte, mehrstufige Teilkostenrechnung postuliert, die eine vollständige Berücksichtigung sämtlicher dem Prozeß zurechenbarer fixer und variabler Einzel- und Gemeinkosten erlaubt. Die Erfassung und Verrechnung der Kosten erfolgt mehrstufig und unter Berücksichtigung der in Kap. 6.2.3 beschriebenen Reagibilitätsgrößen, Erfassungsstufen und Bezugsgrößen. Eine derart modifizierte Erscheinungsform der Kostenrechnung soll im folgenden als "Prozeß-Fixkosten-Deckungsrechnung" bezeichnet werden. Wie in Tab. 15 dargestellt, entspricht sie weitgehend einer Fixkosten-Deckungsrechnung mit Planwerten.

---

<sup>1</sup> Eine detaillierte Gegenüberstellung der verschiedenen Kostenrechnungssysteme erfolgt z.B. in [Heinen 1991]

Umfang der Kostenverrechnung		Istkosten	Normal- und Istkosten	Plan- und Istkosten
Vollkostenrechnung	sämtliche fixe und variable Einzelkosten + sämtliche fixe und variable Gemeinkosten	klassische Vollkostenrechnung, Fixkosten-Deckungsrechnung	Normalkostenrechnung	starre und flexible Vollplankostenrechnung, Prozeßkostenrechnung
	fixe und variable Einzelkosten + verursachte fixe und variable Gemeinkosten	-	-	Prozeß-Fixkosten-Deckungsrechnung
Teilkostenrechnung	nur variable Einzel- und Gemeinkosten	einstufiges und mehrstufiges Direct Costing (mit Istkosten)	-	Grenzplankostenrechnung
	nur Einzelkosten	Rechnung mit relativen Einzelkosten und -erlösen (nach Riebel)	-	Rechnung mit relativen Einzelkosten und -erlösen (nach Riebel)

Tab. 15: Einordnung einer Prozeß-Fixkosten-Deckungsrechnung

Die Abgrenzung der Prozeß-Fixkosten-Deckungsrechnung zur Fixkosten-Deckungsrechnung (klassische Vollkostenrechnung) und zur Grenzplankostenrechnung (klassische Teilkostenrechnung) besteht darin, daß einerseits eine Begrenzung auf produkt-, produktgruppen- und technologiebedingte Einzel- und Gemeinkosten erfolgt, andererseits aber sowohl fixe, als auch variable Einzel- und Gemeinkosten erfaßt und verrechnet werden. Vom Verrechnungsumfang her handelt es sich folglich um eine Teilkostenrechnung, da nur ein Teil der Kosten berücksichtigt wird, vom Charakter her jedoch eher um eine Vollkostenrechnung, da die betrachteten Kosten vollständig verrechnet werden.

Bei der Erfassung und Verrechnung der Kosten im Rahmen des Integrierten Rechnungswesens bestehen somit wesentliche systematische Unterschiede im Vergleich zum traditionellen betrieblichen Rechnungswesen: Zum einen werden Kosten nicht pauschal auf eine Periode bezogen erfaßt und danach in einem zweiten Schritt auf möglich Träger verrechnet. Vielmehr erfolgt eine Zurechnung auf die Flüsse bereits in der Grundrechnung, unter Berücksichtigung ihrer Reagibilität und Zurechenbarkeit sowie bezogen auf die angestrebte Auswertungsgröße der späteren Bewertung. Ein separater Verrechnungsschritt kann damit entfallen. Zum anderen erlaubt die Flußorientierung eine wesentlich verursachungsgerechtere Zuordnung der Kosten, da nicht länger die Gesamtheit aller Kosten einer Kostenart unter Verwendung eines einheitlichen Verrechnungssatzes verrechnet werden. Statt dessen erfolgt die Zuordnung für jeden Fluß einzeln und unter Berücksichtigung der individuellen Reagibilität und Zurechenbarkeit. Unzutreffende Proportionalisierungen, insbesondere der Fixkosten, können auf diese Weise minimiert werden und im Resultat erhält man ein wesentlich genaueres Abbild der tatsächlichen Kostensituation.

Zusammenfassend kann die Kostenartenrechnung im Integrierten Rechnungswesen als eine ökonomische Bewertung aufgefaßt werden, bei der die Ergebnisse der Flußartenrechnung auf wenige Kostenarten in der gemeinsamen Dimension "Geldeinheiten" abgebildet und verdichtet werden. Die auf diese

Weise ermittelten Ergebnisse können direkt für Analysen und zur Verdichtung im Rahmen der Auswertungsrechnung herangezogen werden. Damit wird nicht nur die Aussagekraft der Kostenartenrechnung verbessert, sondern zugleich zur Erhöhung der Durchgängigkeit und Konsistenz von Kostenarten-, Kostenträger- und Investitionsrechnung beigetragen.

## 6.5 Mathematische Modellierung der Grundrechnung

Die mathematische Modellierung der Grundrechnung verdeutlicht noch einmal, wie die Komponenten der Grundrechnung - Flußarten-, Umweltwirkungsarten- und Kostenartenrechnung - miteinander verknüpft sind. Um eine Zusammenstellung der Bewertungsgrößen zu erhalten, die dem in Abb. 16 dargestellten Format entspricht, wird zunächst die Prozeßbilanz als (mx1)-Vektor der In- und Outputs dargestellt, dessen Elemente den bereits verrechneten Flußgrößen entsprechen. Durch eine skalare Multiplikation mit einer (mxm)-Einheitsmatrix wird dieser Flußgrößenvektor in eine Input-Output-Matrix IOM der Dimension (mxm) umgewandelt, die anschließend mit einer Wirkungsfaktorenmatrix WFM skalar multipliziert wird (Abb. 31).

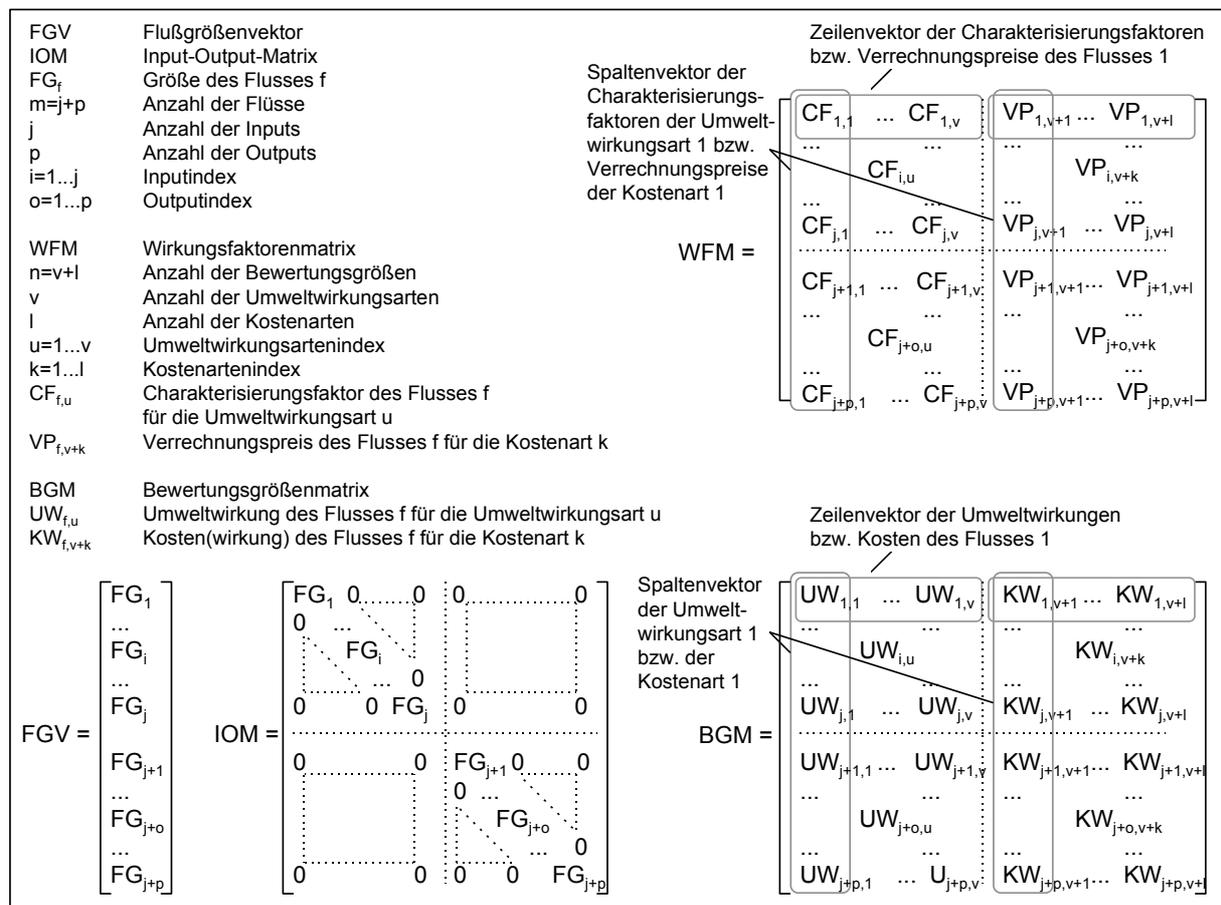


Abb. 31: Ermittlung der Bewertungsgrößenmatrix

In der Wirkungsfaktorenmatrix WFM sind die Multiplikatoren für die Berechnung der Umweltwirkungen (UW) und der Kosten (hier als Kostenwirkungen KW bezeichnet) zusammengefaßt. Bei  $m$  zu bewertenden Flüssen,  $v$  Umweltwirkungsarten und  $l$  Kostenarten ergibt sich eine Matrix der Dimension  $(m \times n)$ , mit  $n=v+l$ , die sich aus einer Charakterisierungsfaktorenmatrix  $(m \times v)$  und einer Verrechnungspreismatrix  $(m \times l)$  zusammensetzt.<sup>1</sup> Die  $(m \times n)$ -Bewertungsgrößenmatrix BGM entspricht in ihrem Aufbau der in Abb. 16 dargestellten Ergebnismatrix der Grundrechnung. Sie setzt sich aus einer Umweltwirkungsmatrix der Dimension  $(m \times v)$  und einer Kostenmatrix der Dimension  $(m \times l)$  zusammen, wobei die Zeilen die ökologischen und ökonomischen Wirkungen der einzelnen Flußarten repräsentieren und die Spalten eine Analyse der einzelnen Umweltwirkungsarten bzw. Kostenarten ermöglichen. Durch eine skalare Multiplikation der transponierten  $(n \times m)$ -Bewertungsgrößenmatrix  $BGM^T$  mit einem Einheitsvektor der Dimension  $(m \times 1)$  lassen sich die Ergebnisse zum Ergebnisvektor der Grundrechnung verdichten, dem Bewertungsgrößenvektor BGV (Abb. 32).<sup>2</sup> Dieser setzt sich aus einem Vektor der  $v$  Umweltwirkungsarten und einem Vektor der  $l$  Kostenarten zusammen.

Für die Ergebnisdarstellung bei der Ermittlung eines allgemeinen Prozeßsatzes bietet es sich an, anstelle eines einzelnen Flußgrößenvektors, zwei getrennte Vektoren für die ausbringungsabhängigen und die zeitabhängigen Flußgrößen zu bilden. Durch Einsetzen entsprechender Parameter für ein Produkt oder eine Produktionsaufgabe läßt sich dann, je nach Auswertungsziel, der Flußgrößenvektor für eine Produkteinheit, eine Periode oder die Nutzungsdauer berechnen.

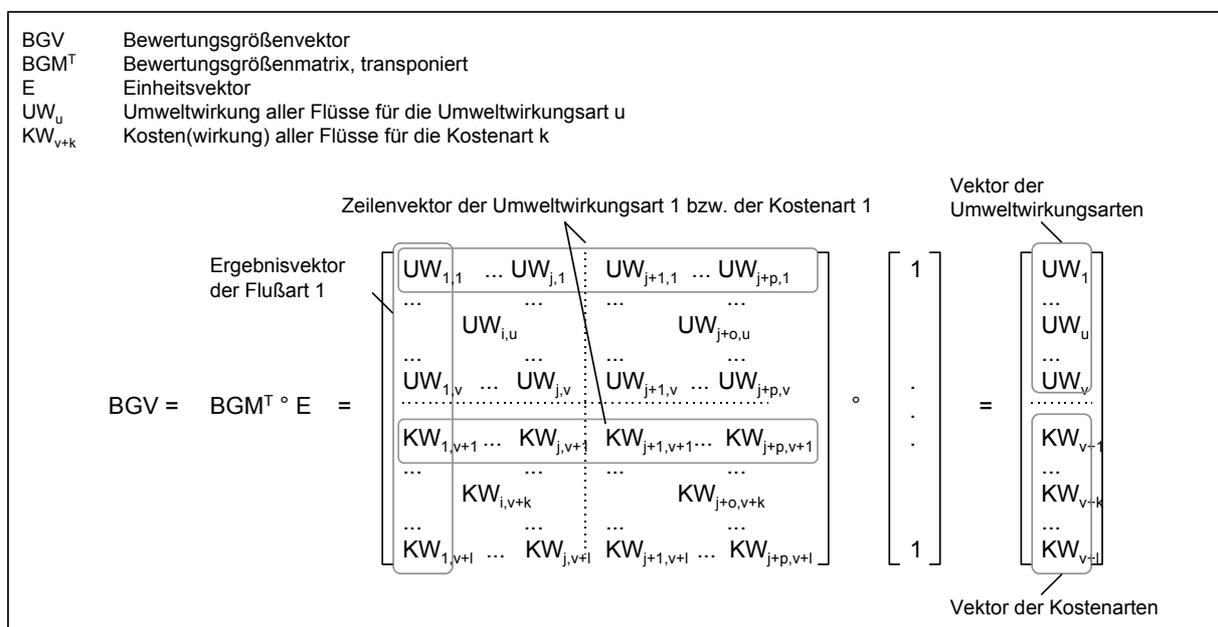


Abb. 32: Ergebnisvektor der Grundrechnung

<sup>1</sup> Bei der Aufstellung der Matrix ist darauf zu achten, daß die Dimensionen der Charakterisierungsfaktoren und Verrechnungspreise mit denen der Flußgrößen abgestimmt sind (d.h. Verwendung derselben Bezugsgrößen).  
<sup>2</sup> Der Bewertungsgrößenvektor BGV läßt sich auch direkt durch eine skalare Multiplikation der Wirkungsfaktorenmatrix WFM mit dem Flußgrößenvektor FGV berechnen. Allerdings erhält man dann nicht die für eine Analyse wichtige Bewertungsgrößenmatrix BGM.

Mit dem erarbeiteten mathematischen Modell der Grundrechnung liegt ein Ökologie- und Ökonomieaspekte integrierendes formales Rechenmodell zur Erfassung des Mengengerüsts und zur Berechnung der Umweltwirkungen und Kosten vor, dessen Ergebnis den Ausgangspunkt für eine anschließende Auswertungsrechnung bildet. Bedingt durch den einfachen Aufbau und die logische Verknüpfung der Matrizen zeichnet sich die Rechnung durch ein hohes Maß an Transparenz der Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der Prozeßbilanz und den ermittelten ökologischen und ökonomischen Auswirkungen aus.

## 7 Auswertungsrechnung der Methode der Integrierten Bewertung

### 7.1 Aufgabe der Auswertungsrechnung

Aufgabe der Auswertungsrechnung der Methode der Integrierten Bewertung ist eine Verdichtung des Ergebnisses der Grundrechnung zu aussagekräftigeren Ergebnisgrößen, da der Bewertungsgrößenvektor, für eine Entscheidungsfindung zu komplex ist. Während die Grundrechnung durch eine objektiv begründbare Abbildung des Bewertungsobjekts und Aufbereitung der Datenlage gekennzeichnet ist, ist eine weitere Aggregation und Verdichtung der Bewertungsgrößen nur mit Hilfe einer Bewertungslogik und unter Berücksichtigung der tatsächlichen bzw. subjektiv beigemessenen Relevanz und der Präferenzen der bewertenden Person möglich. Entsprechend dem in Kap. 5.5 vorgestellten Konzept besteht die Auswertungsrechnung daher aus einer ökologischen und einer ökonomischen Komponente zur Bewertung der Umweltwirkungen bzw. Kosten (Abb. 33).

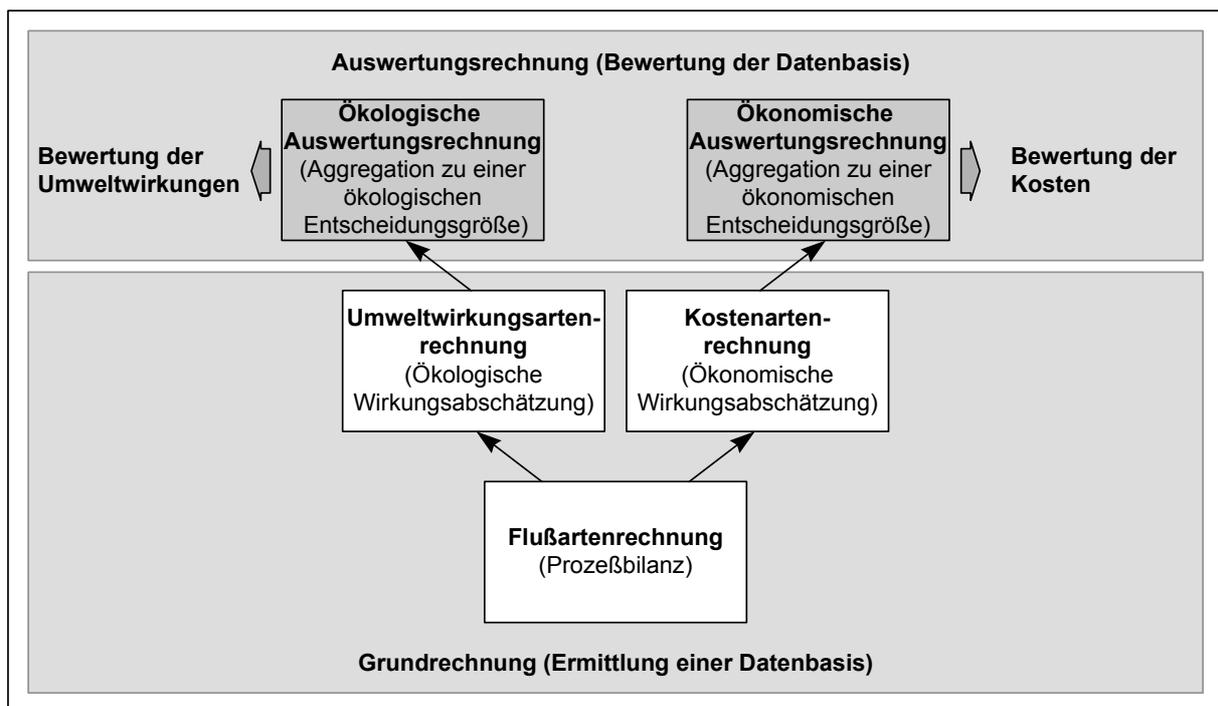


Abb. 33: Stellung der Auswertungsrechnung im Integrierten Rechnungswesen

Nachfolgend wird dargelegt, wie die Umweltwirkungsindikatorergebnisse zu einer ökologischen Entscheidungsgröße, die die Gesamtbelastung der Umwelt widerspiegelt, aggregiert werden können, und wie die Ergebnisse der Kostenartenrechnung zu einer betriebswirtschaftlichen Entscheidungsgröße verdichtet werden können.

Eine weitere Aggregation der auf diese Weise erhaltenen Umwelt- und Kostenkennzahlen zu einer einzigen gemeinsamen Größe wird abgelehnt, da für das vorliegende mehrdimensionale Bewertungs-

problem weder ein allgemeingültiges bzw. konsensfähiges Wertesystem, noch eine entsprechende logisch nachvollziehbare Bewertungslogik existieren, mit der sich die Ergebnisse der ökologischen und ökonomischen Bewertung zu einer Gesamtgröße zusammenfassen lassen würden. Die systematische und nachvollziehbare Aufbereitung und die transparente Darstellung der Ergebnisse reicht allerdings als Basis für eine ganzheitliche Entscheidungsfindung aus, zumal eventuelle Synergieeffekte oder Konflikte zwischen ökologischer und ökonomischer Zielerfüllung aufzeigt werden.

## **7.2 Ökologische Auswertungsrechnung der Methode der Integrierten Bewertung**

### **7.2.1 Definition einer ökologischen Entscheidungsgröße**

Nachdem die ökologischen Auswirkungen der unterschiedlichen Flüsse mit Hilfe der Charakterisierungsfaktoren zu standardisierten Wirkungskategorien zusammengefaßt wurden, sind diese Ergebnisse nun wirkungskategorieübergreifend zu verdichten. Da eine weitere Aggregation der Umweltwirkungen nicht mehr physikalisch-chemisch begründbar ist, ist dies nur mit Hilfe einer Bewertungslogik möglich, die die Werthaltung des Bewertenden bzw. das unternehmerische Zielsystem widerspiegelt.

Bei der Methode der Integrierten Bewertung geschieht dies durch die Bildung eines "Umweltwirkungsindex (UWI)", der die Relevanz der vom untersuchten Prozeß ausgehenden Umweltwirkungen zu einer Kennzahl zusammenfaßt. Der Umweltwirkungsindex wird definiert als der mittlere, gewichtete Anteil des Bewertungsobjekts an einer auf eine Referenzbasis bezogenen Gesamtumweltwirkung. Grundlage dieser Definition ist der Ansatz, daß ein Prozeß aus ökologischer Sicht um so negativer zu bewerten ist, je größer die von ihm verursachte Umweltwirkung in einer Umweltkategorie ist und je kritischer diese Kategorie für das gesamte Umweltsystem ist (d.h. je größer ein Gewichtungsfaktor für die betreffende Umweltwirkungsart ist). Umgekehrt sind kleine Umweltwirkungen bzw. Beiträge zu Wirkungskategorien, die weniger kritisch sind, von geringerer Relevanz und daher weniger negativ zu bewerten.

Die Definition dieser Kennzahl impliziert die in DIN EN ISO 14042 vorgeschlagenen Schritte Normalisierung und Gewichtung als weitgehend konsensfähige und akzeptierte Bewertungslogik (s. auch Ausführungen in Kap. 3.1).<sup>1</sup> Mit Hilfe der Normalisierung der Umweltwirkungen werden für die einzelnen Umweltwirkungsarten die spezifischen Beiträge des Bewertungsobjekts zur Gesamtumweltwirkung eines Referenzobjekts bestimmt. Die unterschiedliche Relevanz der Umweltwirkungsarten wird durch Gewichtungsfaktoren berücksichtigt. Der Umweltwirkungsindex UWI ergibt sich dann aus der Summe der mit den entsprechenden Gewichtungsfaktoren multiplizierten Normalisierungsergebnisse.

---

<sup>1</sup> Zur näheren Erläuterung der Schritte Normalisierung und Gewichtung vgl. [ISO 14042, 2000; Stahl 1999]

Gemäß Definition kann die Kennzahl Werte zwischen 0 und 1 (bzw. 0% und 100%) einnehmen,<sup>1</sup> wobei 1 bedeuten würde, daß der untersuchte Prozeß 100% aller Umweltwirkungen in allen Wirkungskategorien verursachen würde (und damit der einzige umweltrelevante Prozeß im Referenzraum wäre).<sup>2</sup>

Diese Form der Aggregation ist zwar streng genommen nicht naturwissenschaftlich begründbar und enthält durch die Festlegung eines Sets von Gewichtungsfaktoren eine subjektive Komponente (wie jedoch auch jede andere Form einer Bewertung). Die gewählte Bewertungslogik bietet allerdings den entscheidenden Vorteil, daß Datenermittlung und -verdichtung weitgehend auf naturwissenschaftlichen Zusammenhängen basieren und die Aggregation nachvollziehbar, transparent und plausibel erfolgt. Vor allem jedoch ist es möglich, mit Hilfe des Umweltwirkungsindex, die nur sehr schwer faßbaren ökologischen Auswirkungen auf einen einzigen Indikator zu verdichten. Auf diese Weise wird die Anforderung der Praxis erfüllt, komplexe Zusammenhänge für eine betriebliche Entscheidungsfindung auf aussagekräftige und einfach zu kommunizierende Sachverhalte zu komprimieren.

## 7.2.2 Berechnung der ökologischen Entscheidungsgröße

Gemäß der zuvor genannten Definition berechnet sich der Umweltwirkungsindikator UWI als die Summe der normalisierten und mit entsprechenden Gewichtungsfaktoren multiplizierten Gesamtumweltwirkungen über alle Umweltwirkungsarten. Normalisierung und Gewichtung können dabei zu einem Rechenschritt zusammengefaßt werden (Abb. 34).

Mit der Normalisierung erfolgt eine Relativierung der Umweltwirkungen der Flüsse, indem die spezifischen Beiträge des Bewertungsobjekts zur Gesamtumweltwirkung einer entsprechenden Referenzbasis berechnet werden. D.h. die absoluten Größen werden in relative Größen (Anteile einer entsprechenden Gesamtwirkung) umgewandelt und dadurch trotz unterschiedlicher Größenordnungen und Einheiten der Wirkungskategorien miteinander vergleichbar gemacht.

---

<sup>1</sup> Anmerkung: Der Wertebereich von 0 bis 1 gilt jedoch nur, sofern sich die ermittelten Umweltwirkungen und die verwendeten Normalisierungsbasen auf dieselben Bezugsgrößen beziehen.

<sup>2</sup> In der Regel umfaßt die für die Normalisierung herangezogene Referenz mehr als nur den bewerteten Prozeß, so daß sich nur sehr kleine Werte ergeben (z.B. im Bereich  $10^{-12}$ ). Um die Ergebnisse besser handhabbar zu machen, kann der UWI daher ggf. mit einem konstanten Korrekturfaktor multipliziert werden (z.B.  $10^{12}$ ).

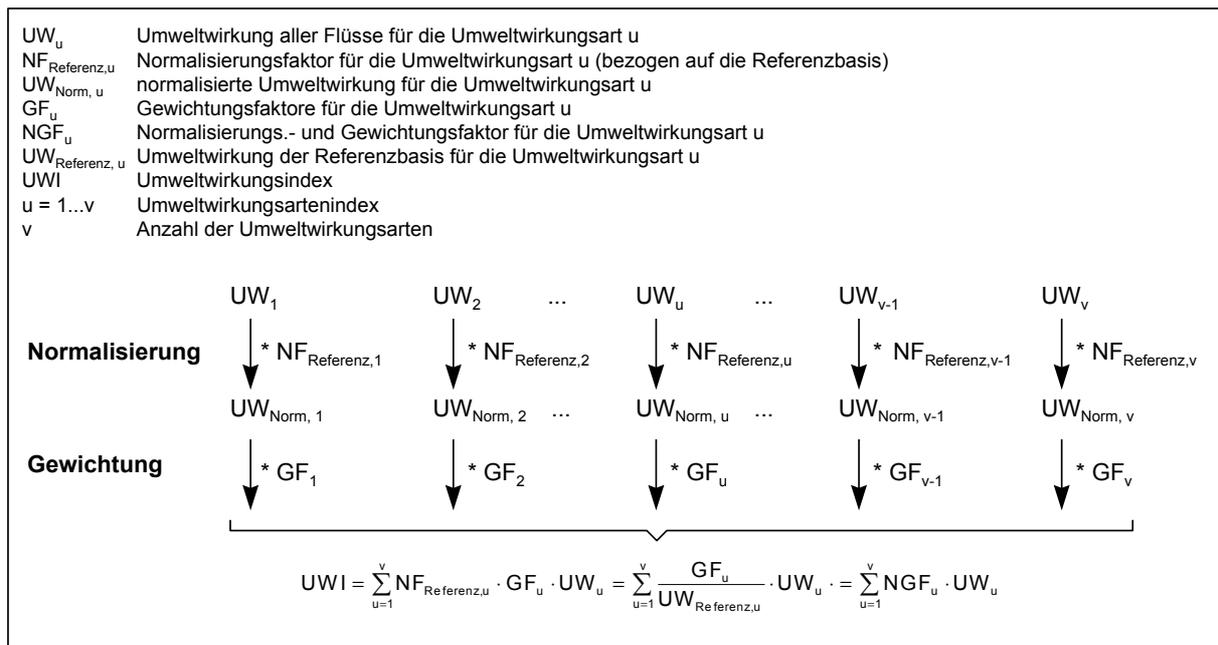


Abb. 34: Normalisierung der Wirkungsindikatorergebnisse

Für eine Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien sind folgende Referenzgrößen für die Normalisierung zweckmäßig:

- Gesamtwerte eines Bezugsraums (Welt, Region, Wirtschaftsraum, Land)
- Personenäquivalente
- Gesamtwerte eines Unternehmens
- Werte eines Referenzprozesses bzw. einer Referenztechnologie
- Gesamtwerte eines Produktlebenswegs

Gesamtwerte und Personenäquivalente eignen sich insbesondere für allgemeingültige und unternehmensübergreifende Vergleiche. Durch die Größe des Untersuchungsrahmens sind beide Normalisierungsbasen als "absolute" und repräsentative Vergleichsmaßstäbe geeignet. Für einzelne Bezugsräume (z.B. Deutschland, EU, OECD) und für die verwendeten Wirkungskategorien ist die erforderliche Datenbasis bereits vorhanden bzw. im Aufbau begriffen [Stahl 1999]. Im Kontext mit übergeordneten und langfristigen Umweltzielen sind diese Basen insbesondere gut geeignet für langfristig strategische Bewertungsaufgaben, da der Beitrag des Unternehmens zur Verbesserung der Gesamtsituation deutlich wird.<sup>1</sup>

Unternehmensspezifische Aussagen, die für eine an individuellen mittel- bis kurzfristigen Umweltschätzungszielen orientierte Entscheidungsfindung geeignet sind, erhält man, wenn die Gesamtwerte

eines Unternehmens als Referenzbasis herangezogen werden. Als Datenbasis für die Ermittlung des Anteils des zu bewertenden Prozesses an der vom Unternehmen verursachten Gesamtumweltwirkung dienen beispielsweise Stoff- und Energiebilanz eines Betriebes, die im Rahmen eines Öko-Audits ermittelt wurden. Aussagekräftige Werte ergeben sich v.a. dann, wenn die Flüsse und Umweltwirkungen für das Unternehmen nach der gleichen Methode ermittelt wurden wie für das Bewertungsobjekt und wenn sich die Ergebnisse auf die gleiche Bezugsgröße (i.d.R. 1 Jahr) beziehen.

Für einen direkten Technologievergleich können auch die Werte einer Referenztechnologie bzw. eines Referenzprozesses als Normalisierungsbasis herangezogen werden. In diesem Fall ist allerdings unbedingt die gleiche Bezugsbasis zu verwenden, da die Ergebnisse sonst ohne Aussagekraft sind.

Bei einer Bewertung alternativer Prozesse kann darüber hinaus auch die Fragestellung interessant sein, wie hoch die Relevanz eines Prozesses für den gesamten Lebensweg eines bestimmten Produktes ist, da ein kleiner Anteil eines Prozesses an den gesamten mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt die Bedeutung von Unterschieden zwischen Prozeßalternativen relativiert.

Für eine Technologiebewertung mit Anspruch auf Allgemeingültigkeit ist die Verwendung von Gesamtwerten eines Unternehmens, Referenzprozessen oder Produktlebenswegen als Normalisierungsbasis nur dann geeignet, wenn eine ausreichende Repräsentanz gewährleistet ist. Andernfalls sind die Ergebnisse nur eingeschränkt allgemeingültig und nicht bzw. nur bedingt übertragbar.

Ein weiterer Aspekt bei der Auswahl einer Normalisierungsbasis ist die mögliche Aussagekraft des Ergebnisses. Für den Fall, daß die gewählte Normalisierungsbasis und die Bezugsgröße der Grundrechnung in keinem kausalen Zusammenhang zueinander stehen (z.B. Gesamtemissionen pro Jahr und Wirkungsraum versus Emissionen pro Produkteinheit), besitzt das Ergebnis der Normalisierung keine anschauliche Bedeutung. Der UWI stellt dann lediglich ein (künstliches) Maß dar für die relative Relevanz der Indikatorergebnisse in den einzelnen Kategorien. Es ist daher anzustreben, daß die Normalisierungsbasis und die Bezugsgröße der Grundrechnung von der Charakteristik her vergleichbar sind. Die Auswahl einer geeigneten Normalisierungsbasis ist somit stark von der jeweiligen Bewertungssituation und der angestrebten Aussage abhängig. Ungeachtet der genannten Einschränkungen besteht der entscheidende Vorteil einer jeden Normalisierung darin, daß die Ergebnisse der ökologischen Grundrechnung "gleichnamig" gemacht werden. Erst hierdurch wird die Relevanz der Ergebnisse für die unterschiedlichen Wirkungskategorien überhaupt vergleichbar und damit auch bewertbar. Da es sich bei den ermittelten Beiträgen um relative Größen gleicher Dimension handelt, ist die Voraussetzung für eine weitere Aggregation gegeben.

Die auf die Normalisierung folgende Gewichtung dient dazu, die unterschiedliche Bedeutung, die den verschiedenen Wirkungskategorien beizumessen ist, und Präferenzen des Bewertenden bei einer Ent-

---

<sup>1</sup> Anmerkung: Die Verwendung großer Referenzwerte führt zu entsprechend kleinen Normalisierungsergebnissen (z.B. im Bereich  $10^{-12}$ ). Die Aussagekraft wird hierdurch jedoch nicht geschmälert, da die Werte mit denen einer Alternative zu vergleichen sind, die ebenfalls in einer ähnlichen Größenordnung liegen.

scheidungsfindung zu berücksichtigen. Um die Bewertung nachvollziehbar zu machen, ist das Zustandekommen der Gewichtungsfaktoren zu dokumentieren und zu begründen. Stahl hat in ihrer Dissertation verschiedene Gewichtungsansätze und –faktoren vorgestellt, die auch für eine Bewertung von Produktionstechnologien und -prozessen geeignet sind (Abb. 35).

<b>Leitbild Sustainable Development</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ziel (Vision): Chancengleichheit heutiger und zukünftiger Generationen bezüglich Entwicklungsmöglichkeiten und Umweltbedürfnissen.</li> <li>• Entwickelt auf der Konferenz der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro (1992).</li> <li>• Allgemein anerkannt und Basis für politische Zielsetzungen.</li> <li>• Ermittlung der Gewichtungsfaktoren über subjektive Bewertung und Analytical Hierarchy Process (Paarvergleich und Präferenzenordnung).</li> </ul>
<b>Umweltpolitische Ziele</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geprägt durch gesellschaftliches Bewußtsein und politisch erzielbarem Konsens. (Einfluß verschiedener Interessengruppen.)</li> <li>• Kompromiß zwischen politisch Machbarem und ökologisch Erforderlichem. (Politischer Pragmatismus.)</li> <li>• Differenzierung zwischen kurz- und langfristigen Zielen.</li> <li>• Ermittlung der Gewichtungsfaktoren mit dem Distance-to-target-Ansatz.</li> </ul>
<b>Experten-einschätzung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basis: Delphi-Befragung.</li> <li>• Experten sind geprägt durch Leitbild Sustainable Development, gesellschaftliche Diskussion, politische Ziele und wissenschaftliche Erkenntnisse.</li> </ul>
<b>Bevölkerungspräferenzen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basis: Umfrageergebnisse.</li> <li>• Meinung werden stark geprägt durch öffentliche/politische Diskussion.</li> </ul>
<b>Unternehmensziele/-politik</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basis: Umweltziele und -politik des Unternehmens (Distance to target).</li> <li>• Gewichtung v.a. geprägt durch eigene Schwachstellen und externen Druck.</li> <li>• Unternehmensindividuelle Gewichtung.</li> </ul>

Abb. 35: Ansätze zur Gewichtung der Wirkungskategorien nach Stahl [Stahl 1999]

Zur Bewertung von Produktionstechnologien und -prozessen im Sinne dieser Arbeit empfiehlt sich eine Orientierung am Leitbild Sustainable Development, da dieses allgemein akzeptiert ist und in Einklang mit den gewählten Bewertungskriterien steht (s. Kap. 5.2). Eine Ausrichtung an umweltpolitischen Zielen wäre zwar handlungsorientierter, jedoch befinden sich entsprechende Vorgaben in Deutschland noch im Entstehungsstadium, so daß die weitere Entwicklung erst noch abzuwarten ist.

Für die betriebliche Praxis spielt natürlich auch eine aus der Umweltpolitik und den Umweltzielen des jeweiligen Unternehmens abgeleitete Gewichtung eine große Rolle, da auf diese Weise unternehmensspezifische Problemfelder und das Wertesystem des Unternehmens besser berücksichtigt werden können. Voraussetzung ist jedoch, daß die Unternehmensführung einen entsprechenden, längerfristig gültigen Satz an Gewichtungsfaktoren verabschiedet und vorgibt.

Eine Analyse der von Stahl erarbeiteten Ergebnisse zeigt - abgesehen von einzelnen Werten - eine relative hohe Übereinstimmung der Gewichtungsansätze hinsichtlich der Einschätzung der relativen Bedeutungen der Wirkungskategorien (Tab. 16).

Wirkungskategorien (Umweltwirkungsarten)	Gewichtungsansätze					
	Sustain. Develop- ment	Politische Ziele (lang- fristig)	Politische Ziele (kurz- fristig)	Experten- Umfrage (Delphi)	Bevölk.- Umfrage (IPOS)	Bevölk.- Umfrage (Euro- barometer)
Treibhauseffekt	28%	20%	9%	16%	9%	16%
Ozonzerstörung	22%	24%	43%	16%	22%	18%
Versauerung	6%	18%	18%	12%	18%	15%
Eutrophierung	6%	16%	9%	9%	8%	16%
Ökotoxizität	16%	8%	5%	15%	14%	11%
Energieeinsatz	17%	7%	4%	17%	13%	13%
Ressourceneinsatz	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Abfallmenge	4%	6%	11%	14%	15%	10%
<i>Summe</i>	<i>100%</i>	<i>100%</i>	<i>100%</i>	<i>100%</i>	<i>100%</i>	<i>100%</i>

Tab. 16: Gewichtungsfaktoren für die verschiedenen Gewichtungsansätze [Stahl 1999]

### 7.3 Ökonomische Auswertungsrechnung der Methode der Integrierten Bewertung

#### 7.3.1 Definition ökonomischer Entscheidungsgrößen

Aufgabe der ökonomischen Auswertungsrechnung in der Methode der Integrierten Bewertung ist die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des untersuchten Prozesses bzw. der untersuchten Technologie. Ein Produktionsprozeß bzw. der Einsatz einer Produktionstechnologie ist im Sinne dieser Arbeit daher genau dann wirtschaftlich, wenn die Kosten zur Erfüllung einer vorgegebenen Produktionsaufgabe durch die Erlöse der hergestellten Produkte mehr als gedeckt werden, wobei ggf. Diskontierungsfaktoren bei einer mehrperiodigen Betrachtung zu berücksichtigen sind. Da mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methode lediglich ein einzelner Prozeß bewertet wird, ist eine vollständige Produktkalkulation nur dann möglich, wenn der Untersuchungsrahmen derart gewählt wird, daß eine am Markt verkaufsfähige Einheit hergestellt wird bzw. ein Einzelteil, für das ein entsprechender Bauteilpreis erzielt werden kann. Für den Fall, daß keine Erlöse vorliegen, z.B. weil keine innerbetriebliche Leistungsverrechnung erfolgt, ist ein Prozeß genau dann betriebswirtschaftlich optimal, wenn die Summe der verursachten Kosten minimal ist.

Diese Betrachtungsweise weicht insofern von der im betrieblichen Rechnungswesen üblichen ab, als man dort unter einer Auswertungsrechnung in der Regel eine Kostenträgerrechnung, d.h. eine Produktkalkulation, versteht. Im Mittelpunkt der Auswertungsrechnung bei der Integrierten Bewertung steht dagegen die Ermittlung der insgesamt von einem Prozeß verursachten Kosten zur Erfüllung einer bestimmten Produktionsaufgabe, die im folgenden als Produktionsprozeßkosten bezeichnet werden. Die Ergebnisse können dann als Grundlage für eine Entscheidungsfindung durch Kosten- bzw. Ziel-

kostenvergleiche herangezogen werden oder dazu dienen, Verrechnungspreise für die Inanspruchnahme des Produktionsprozesses abzuleiten.

Aus den Daten der Grundrechnung können folgende produktorientierte ökonomische Entscheidungsgrößen berechnet werden:

- Produktionsprozeßkosten pro Produkteinheit einer Produktart ( $PPK_{PE}$ ) und
- Produktionsprozeßkosten für ein Produktspektrum ( $PPK_{PS}$ ), unter Berücksichtigung der Stückzahlen der einzelnen Produktarten.

Bei einer Auswertung nach Zeitaspekten lassen sich - für eine gegebenes Produktspektrum - folgende Entscheidungsgrößen berechnen:

- Produktionsprozeßkosten pro Kapazitätszeiteinheit ( $PPK_{ZE}$ ; i.d.R. bezogen auf 1 Stunde),
- Produktionsprozeßkosten pro Periode ( $PPK_{PJ}$ ; i.d.R. bezogen auf 1 Jahr) und
- Produktionsprozeßkosten für die Nutzungsdauer der Investition ( $PPK_{PN}$ )

Darüber hinaus gestattet die Methode der Integrierten Bewertung die Ermittlung eines allgemeinen Produktionsprozeßkostensatzes ( $PPK_{Satz}$ ). Ermöglicht wird dies durch die detaillierte Datenerfassung und die Berücksichtigung der Reagibilität im Rahmen der Grundrechnung. Als universelle, parametrisierte Ergebnisgröße spiegelt der Produktionsprozeßkostensatz die Kostenstruktur wider und besteht aus einer ausbringungsabhängigen und einer zeitabhängigen Komponente (s. Kap. 6.2.8).

Die Produktionsprozeßkosten umfassen jeweils die Einzelkosten und anteiligen Gemeinkosten der betreffenden Verrechnungsstufe einschließlich untergeordneter Stufen sowie einen Gemeinkostenanteil übergeordneter Verrechnungsstufen (s. Kap. 6.2.5). Der wesentliche Unterschied zur bestehender Praxis der Kostenrechnung besteht darin, daß aufgrund der detaillierten und nach Ausbringungs- bzw. Zeitabhängigkeit differenzierten Grundrechnung eine wesentlich verursachungsgerechtere Verrechnung von Fix- und Gemeinkosten möglich ist, als bei der Anwendung pauschaler Zuschlagssätze. Da die Ermittlung der Kosten in der Grundrechnung nach Kostenarten differenziert erfolgt, können die ermittelten Prozeßkosten entweder als Summenwert angegeben oder, z.B. für weiterführende Analysen, nach Kostenarten aufgeschlüsselt werden.

Die in Grund- und Auswertungsrechnung ermittelten Kosten können direkt für eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit des untersuchten Prozesses bzw. der Technologie verwendet werden. Von den in Kap. 3.2 beschriebenen Methoden bietet sich v.a. eine Kostenvergleichsrechnung auf Basis der Kosten pro Produkteinheit oder der Gesamtkosten für die Nutzung des Prozesses bzw. der Technologie an. Soll der Faktor "Zeit" stärker in der Bewertung berücksichtigt werden, so kann eine dynamische Investitionsrechnung unter Verwendung der ermittelten Periodenergebnisse und entsprechender Diskontierungsfaktoren durchgeführt werden.

### 7.3.2 Berechnung der ökonomischen Entscheidungsgrößen

Wie in Kap. 6.2.4 dargelegt wurde, erfordert eine verursachungsgerechte Abbildung der Daten- und Kostenstruktur eine Orientierung an den angestrebten Ergebnisgrößen der späteren Auswertungsrechnung. Für die Berechnung der ökonomischen Ergebnisgrößen hat dies zur Folge, daß im wesentlichen eine Summation der einzelnen Beiträge zu den Kostenarten ausreicht, da sich die in der Grundrechnung erfaßten Kosten bereits auf richtige Bezugsgröße beziehen (Abb. 36).

PPK <sub>Bezug</sub>	Produktionsprozeßkosten (der jeweiligen Bezugsgröße)	
KW <sub>k</sub>	Kosten(wirkung) für die Kostenart k	
k = 1...l	Kostenartenindex	
l	Anzahl der Kostenarten	
<b>Produktionsprozeßkosten</b>	pro Produkteinheit einer Produktart:	$PPK_{PE} = \sum_{k=1}^l KW_{PE,k}$
	für ein Produktspektrum:	$PPK_{PS} = \sum_{k=1}^l KW_{PS,k}$
	pro Periode (Jahr):	$PPK_{PJ} = \sum_{k=1}^l KW_{PJ,k}$
	pro Kapazitätszeiteinheit:	$PPK_{ZE} = \sum_{k=1}^l KW_{ZE,k}$
	für die Nutzungsdauer der Investition:	$PPK_{PN} = \sum_{k=1}^l KW_{PN,k}$
<b>Produktionsprozeßkostensatz</b> als allgemeine Kalkulationsgröße:		$PPK_{Satz} = \sum_{k=1}^l KW_{Satz,Ausbringung,k} + \sum_{k=1}^l KW_{Satz,Zeit,k}$

Abb. 36: Berechnung der ökonomischen Entscheidungsgrößen

Ein wichtiger Aspekt für die Praxis ist die Möglichkeit der Einbindung der Auswertungsrechnung der Methode zur Integrierten Bewertung in bestehende Kostenrechnungssysteme. Die in dieser Arbeit konzipierte Prozeß-Fixkosten-Deckungsrechnung (s. Kap. 6.4) soll in erster Linie dazu dienen, den Prozeß der Entscheidungsfindung in der Planungsphase zu unterstützen. Da bestehende Kostenrechnungssysteme nicht in der Lage sind, Informationen in dem gewünschten Detaillierungsgrad bereitzustellen oder zu verarbeiten, empfiehlt sich bis auf weiteres eine Sonderrechnung auf Projektbasis. Mit zunehmendem Planungsfortschritt, spätestens jedoch nach der Installation des Produktionsprozesses, sollte eine Übernahme der Berechnungsergebnisse bzw. der tatsächlichen Kosten in konventionelle Formen der Kostenrechnung angestrebt werden (Abb. 37).

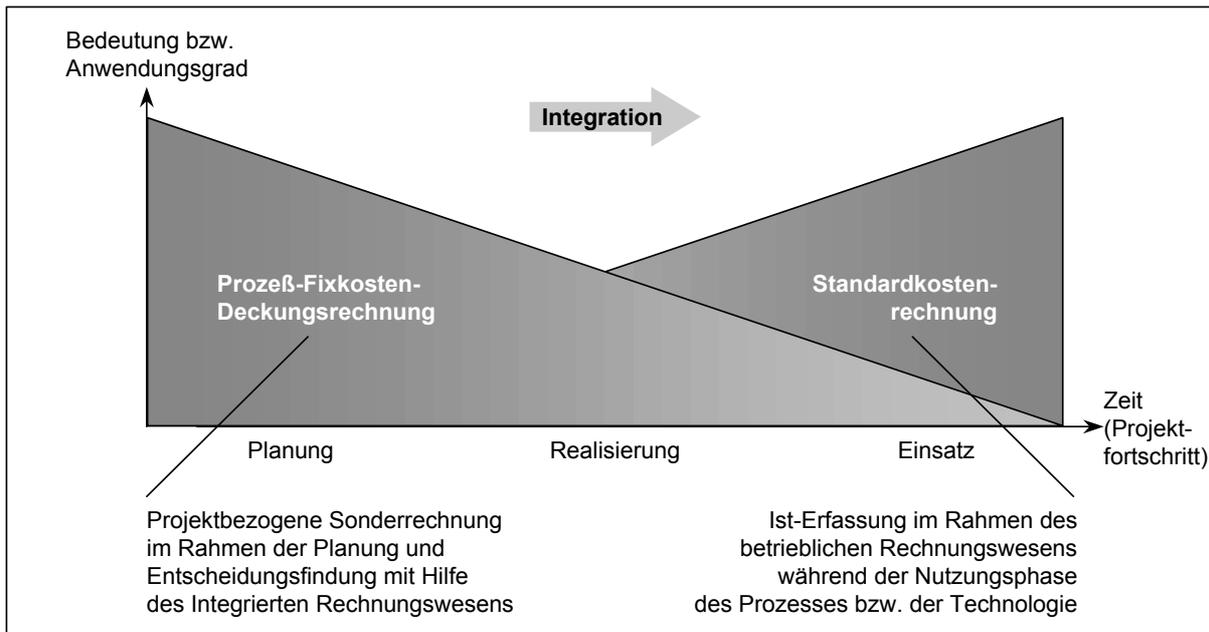


Abb. 37: Einbindung in bestehende Systeme der Kostenrechnung

Im Integrierten Rechnungswesen werden die Kostenwerte detaillierter als allgemein üblich erfaßt, d.h. nicht nur nach Kostenarten, sondern zusätzlich noch nach ausbringungs- und zeitabhängigen sowie fixen und variablen Kosten. Sie können daher problemlos in das gröbere Raster der im jeweiligen Unternehmen zum Einsatz kommenden Kostenrechnungssysteme eingeordnet werden (Abb. 38).

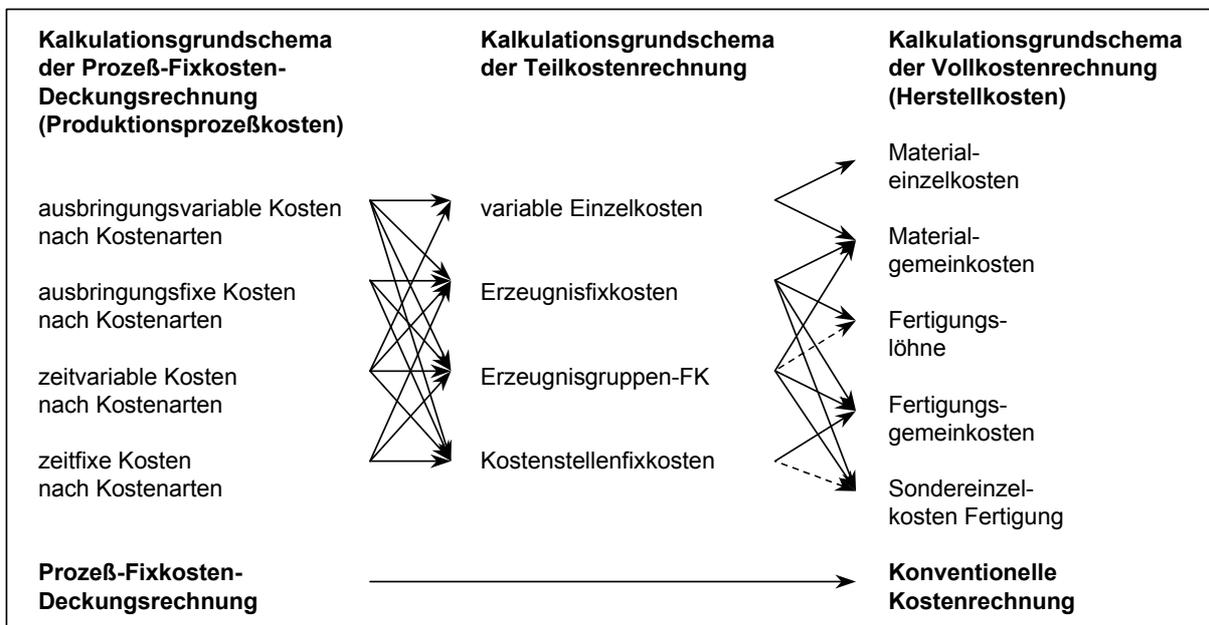


Abb. 38: Kompatibilität zur konventionellen Kostenrechnung

## 7.4 Mathematische Modellierung der Auswertungsrechnung

Als Zusammenfassung des Rechenablaufs werden die Schritte der ökologischen und ökonomischen Auswertungsrechnung nach Abb. 39 noch einmal in Form eines mathematischen Modells dargestellt. Der transponierte Bewertungsgrößenvektor  $BGV^T$  der Grundrechnung, der aus den für die Bezugsgröße der Bewertung ermittelten Umweltwirkungen und Kosten besteht, wird skalar mit der Bewertungs- und Aggregationsmatrix BAM multipliziert. Diese besteht im wesentlichen aus den Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren NGF zur Normalisierung und Gewichtung der Umweltwirkungsarten. Der Ergebnisvektor der Auswertungsrechnung umfaßt die beiden Entscheidungsgrößen

- Umweltwirkungsindex UWI und
- Produktionsprozeßkosten PPK.

Je nach gewünschter Bewertungsaussage werden für diese beiden Ergebnisgrößen unterschiedliche Bezugsgrößen herangezogen, die denen der Grundrechnung entsprechen. Bei einer Prozeß- bzw. Produktkalkulation sind insbesondere eine Kapazitätszeiteinheit bzw. eine Produkteinheit einer Produktart relevant, während für eine Investitionsbewertung v.a. Produktspektrum, Periode und Nutzungsdauer der Investition von Bedeutung sind. Für eine Technologiebewertung bezieht sich die Berechnung des allgemeinen Prozeßsatzes in der Regel auf eine repräsentative Produkteinheit für die ausbringungsabhängigen Größen sowie eine Kapazitätszeiteinheit für die zeitabhängigen Werte.

$EV^T$	Ergebnisvektor , transponiert
$BGV^T$	Bewertungsgrößenvektor, transponiert
BAM	Bewertungs- und Aggregationsmatrix
$UW_u$	Umweltwirkung aller Flüsse für die Umweltwirkungsart u
$KW_{v+k}$	Kosten(wirkung) aller Flüsse für die Kostenart k
$NGF_u$	Normalisierungs- und Gewichtungsfaktor für die Umweltwirkungsart u
$NF_{Referenz,u}$	Normalisierungsfaktor für die Umweltwirkungsart u (bezogen auf die Referenzbasis)
$GF_u$	Gewichtungsfaktore für die Umweltwirkungsart u
$UW_{Referenz,u}$	Umweltwirkung der Referenzbasis für die Umweltwirkungsart u
UWI	Umweltwirkungsindex
PPK	Produktionsprozeßkosten

$$EV^T = BGV^T \circ BAM = \left[ \begin{array}{c|c} \text{Vektor der} & \text{Vektor der} \\ \text{Umweltwirkungsarten} & \text{Kostenarten} \end{array} \right] \circ \begin{bmatrix} UW_1 & \dots & UW_u & \dots & UW_v & KW_{v+1} & \dots & KW_{v+k} & \dots & KW_{v+i} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} NGF_1 & 0 \\ \dots & \cdot \\ NGF_u & \cdot \\ \dots & \cdot \\ NGF_v & 0 \\ 0 & 1 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = [UWI, PPK]$$
  

mit:  $NGF_u = NF_{Referenz,u} \cdot GF_u = \frac{GF_u}{UW_{Referenz,u}}$

Abb. 39: Mathematische Modellierung der Auswertungsrechnung

Mit Vorliegen dieser Kennzahlen ist die Datenermittlung, -aufbereitung und -bewertung abgeschlossen. Dadurch, daß die Grund- und Auswertungsrechnung klar gegeneinander abgegrenzt sind und die Aggregation erst zu einem späten Zeitpunkt erfolgt, ist eine Trennung von Sach- und Wertebene ebenso gewährleistet wie eine hohe Transparenz und eine einfache Nachvollziehbarkeit der Bewertung.

Für eine Entscheidungsfindung sind die ermittelten Ergebnisgrößen lediglich mit entsprechenden Zielvorgaben des Unternehmens oder mit Referenzwerten alternativer Prozesse bzw. Technologien zu vergleichen.

## **8 Anwendung der Methode der Integrierten Bewertung**

### **8.1 Ausprägungsformen der Methode der Integrierten Bewertung**

Die in Kap. 6.2 beschriebenen unterschiedlichen Anwendungsfälle für eine integrierte Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien bedingen unterschiedliche Ausprägungsformen der Bewertungsmethode, die durch eine auf die jeweilige Aufgabenstellung angepasste Form der Datenaufbereitung charakterisiert sind. Ausgehend von dem gemeinsamen übergeordneten Ziel "Bestimmung der optimalen Produktionstechnologie" bzw. "Gestaltung eines optimalen Prozesses" werden nachfolgend für die unterschiedlichen Anwendungsfälle die jeweiligen Bewertungsaufgaben charakterisiert, spezifische Besonderheiten der Grund- und Auswertungsrechnung herausgestellt und die angestrebten Bewertungsergebnisse beschrieben.

#### **8.1.1 Prozeß- bzw. Produktkalkulation**

Die Methode der Integrierten Bewertung in Form einer Produkt- bzw. Prozeßkalkulation wird vor allem dann eingesetzt, wenn die Eignung einer Technologie zur Herstellung eines konkreten Produkts oder Produktspektrums bewertet werden soll. Wird der Untersuchungsrahmen weit genug gewählt, so daß er alle zur Herstellung eines verkaufsfähigen Produktes erforderlichen Schritte umfaßt, dann handelt es sich um eine Produktkalkulation. Ansonsten sollte von einer Prozeßkalkulation gesprochen werden, da nur die Umweltwirkungen und Kosten eines von mehreren zur Herstellung eines Produkts erforderlichen Prozeßschritten ermittelt werden können.

Als Bezugsgröße der Grund- und Auswertungsrechnung dient entweder ein Einzelprodukt (z.B. bei einer Großserienproduktion), ein repräsentatives Produkt (bei einem relativ homogenen Produktspektrum) oder ein repräsentatives Produktspektrum, für das die Ergebnisse gemittelt werden (bei einem sehr heterogenen Produktspektrum)<sup>1</sup>.

In der Grundrechnung werden nach dem Verursachungsprinzip ermittelte fixe und variable Einzel- und Gemeinflüsse auf die Bezugsgröße Produkteinheit verrechnet (s. Kap. 6.2.5). Im Gegensatz zu einer progressiven Kalkulation der Kostenträgerrechnung [Heinen 1991] werden Gemeinflüsse dabei nicht mittels pauschaler prozentualer Zuschlagssätze auf Flußartenbasis berücksichtigt. Statt dessen erfolgt die Zurechnung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Zurechenbarkeit auf das Produkt und unter Berücksichtigung individueller Produkt- und Prozeßparameter (z.B. zeitliche Inanspruchnahme zur Verrechnung des Energieverbrauchs) oder Verteilungsschlüssel (z.B. Verhältnis der Stückzahlen).

---

<sup>1</sup> Der Einfachheit halber wird im folgenden unterstellt, daß es sich um ein Einzelprodukt handelt.

Beispielsweise werden die Kosten einer Produktgruppe nur auf die tatsächlich zu ihr gehörenden Produktarten geschlüsselt, so daß eine künstliche und unzutreffende Proportionalisierung von Fix- und Gemeinkosten vermieden wird.

Als Ergebnis der Grundrechnung erhält man neben der Input-Output-Matrix auf Flußebene die Umweltwirkungsindikatorergebnisse und Kosten, die jeweils nach Arten differenziert sind und sich auf eine Produkteinheit bzw. das untersuchte Produktspektrum beziehen. Bei Bedarf können diese Ergebnisse noch weiter hinsichtlich Sensitivität und Einflußfaktoren untersucht und ggf. grafisch aufbereitet werden. Die Ergebnisgrößen der Auswertungsrechnung, Umweltwirkungsindex UWI und Produktionsprozeßkosten PPK, beziehen sich auf eine Produkt- bzw. Prozeßoutputeinheit und entsprechen den Ergebnissen einer Produktökobilanz (ökologische Bewertung) bzw. einer Produktkalkulation (ökonomische Bewertung).

Bei einem Vergleich mehrerer Prozeßalternativen zur Herstellung der Produkte erfolgt die eigentliche Bewertung im Sinne einer Entscheidungsvorbereitung durch Gegenüberstellung der für die Alternativen ermittelten Ergebnisgrößen oder durch einen Vergleich mit Zielvorgaben, z.B. Umwelt- und Kostentargets, um die optimale Lösung zu identifizieren. Bei einer Einzelbewertung beschränkt sich die Beurteilung in der Regel darauf, inwieweit Zielvorgaben erfüllt werden. Typische Bewertungsergebnisse können die Identifikation der besten Prozeßalternative, Empfehlungen hinsichtlich des Wechsel der einzusetzenden Produktionstechnologie oder Vorschläge hinsichtlich Eigen- bzw. Fremdfertigung sein.

Für den Fall, daß keine der Alternativen sowohl in ökologischer, als auch in ökonomischer Hinsicht die optimale Wahl darstellt, ist die Bewertungsaussage nicht eindeutig. Es ist dann eine Abwägung erforderlich, welche der Lösungen den besten Kompromiß zwischen Wirtschaftlichkeit und Umweltgerechtigkeit darstellt. Diese Entscheidung läßt sich jedoch nicht vorgeben oder durch ein Modell regeln, sondern kann nur unter Berücksichtigung der individuellen unternehmerischen Situation und Randbedingungen sowie der fallspezifischen Differenzen zwischen den Ergebnissen erfolgen. Die Leistung der Methode der Integrierten Bewertung besteht in diesen Fällen darin, daß aufgrund der transparenten Aufbereitung der Datenlage erkennbar ist, wie groß die zu akzeptierenden Abweichungen von der jeweils ökologisch bzw. ökonomisch optimalen Teillösung ausfallen.

### **8.1.2 Investitionsbewertung**

Ein wichtiges Anwendungsgebiet der Methode der Integrierten Bewertung im Rahmen eines strategischen und taktischen Produktionsmanagements ist die Beurteilung von Investitionsalternativen, d.h. die Bestimmung der optimalen Alternative. In diesem Zusammenhang gilt es zu prüfen, ob und wie gut ökologische und ökonomische Zielvorgaben durch eine Investition erfüllt werden.

Der Grund- und Auswertungsrechnung ist eine spezifische Produktionsaufgabe als Bezugsgröße zugrunde zu legen, so daß sich die Datenbasis im Unterschied zum vorherigen Kapitel häufig nicht auf ein einzelnes Produkt (Großserienproduktion), sondern auf ein Produktspektrum (Kleinserienproduktion) bezieht. Ein weiteres wesentliches Merkmal einer Investitionsbewertung ist die Betrachtung der gesamten Nutzungszeit der Investition. Bei stärkeren Schwankungen über der Zeit erfolgt die Datenermittlung periodenweise, so daß gegebenenfalls Anlauf- und Auslaufphasen berücksichtigt werden können. Flüsse mit eher einmaligem Charakter oder Veränderungen während der Laufzeit im Produktionsvolumen oder -spektrum können auf diese Weise einfacher berücksichtigt werden.

Werden die Kenngrößen Umweltwirkungsindikator UWI und Produktionsprozeßkosten PPK nicht direkt auf die gesamte Nutzungszeit der Investition bezogen, sondern für die einzelnen Perioden separat ermittelt, dann können die Ergebnisse in Form von zeitabhängigen Verlaufskurven dargestellt werden. Liegen darüber hinaus Angaben zu Erlösen vor, dann lassen sich Wirtschaftlichkeit und Amortisationsdauer einer Investition als zusätzliche Kennzahlen berechnen. Für eine dynamische Betrachtung sind dabei die einzelnen Zeitpunkte der Kosten- bzw. Erlösentstehung durch eine entsprechende Diskontierung zu berücksichtigen.<sup>1</sup>

Werden Flüsse, Kosten und Umweltwirkungen nicht nur nach Perioden, sondern darüber hinaus auch noch nach ihrem Zweck differenziert, so ergeben sich weitere detaillierte Analysemöglichkeiten. Bei den Aufwendungen für die Leistungsbereitschaft handelt sich in erster Linie um ausbringungs- und zeitfixe Größen mit einmaligem Charakter, die dazu dienen, die Voraussetzungen für die eigentliche Leistungserstellung zu schaffen. Dagegen hängen die Werte der Leistungserstellung vom tatsächlich realisierten Produktionsprogramm ab, d.h. es handelt sich vor allem um ausbringungs- und zeitvariable Größen, die von Art, Menge und Wert der erstellten Leistungen abhängen.

Wie bei der Produktkalkulation erfolgt die Beurteilung der Ergebnisse einer Investitionsbewertung durch einen Vergleich von Handlungsalternativen und mit Zielvorgaben. Neben mehreren zur Auswahl stehenden Prozessen und Technologien stellt auch eine "Nicht-Investition" stets eine Handlungsalternative dar und kann z.B. eine Beibehaltung des bestehenden Prozesses (Status quo) oder Fremdbezug der Leistungen anstelle einer eigenen Investition bedeuten. Im Falle eines Fremdbezugs sind die extern verursachten Umweltwirkungen und die Fremdbezugskosten über die Laufzeit der Investitionsalternativen aufzusummieren und den eigenen Umweltwirkungen bzw. Produktionskosten gegenüberzustellen. Die Bewertung einer Einzellösung erfordert in jedem Fall eine Vorgabe entsprechender Zielwerte, wie z.B. maximal zulässige Umweltwirkungen pro Jahr für die ökologische Bewertung und

---

<sup>1</sup> Eine Diskontierung ökologischer Wirkungen wäre zwar theoretisch denkbar, allerdings besteht kein Konsens darüber, ob und in welchem Ausmaß erst in Zukunft entstehende Umweltwirkungen positiver oder negativer zu bewerten wären. Es wäre jedoch zu erwarten, daß mit zunehmendem Abstand zur Gegenwart negative Auswirkungen auf die Umwelt eher relativ besser zu bewerten wären, da dann die Möglichkeit besteht, bis zum Zeitpunkt der Entstehung Lösungsansätze zu ihrer Vermeidung, Kompensation oder Tolerierung zu finden.

für die ökonomische Bewertung maximal zulässige Gesamtkosten, Vorgaben bezüglich Amortisationszeit oder einen internem Mindestzinsfuß.<sup>1</sup>

### 8.1.3 Technologiebewertung

Mit einer Technologiebewertung werden möglichst allgemeingültige Aussagen über die Vorteilhaftigkeit einer Produktionstechnologie angestrebt. Die Ergebnisse können beispielsweise für eine Vorauswahl einzusetzender Technologien genutzt werden, die Ausgangsbasis für eine detaillierte Planung von Produktionsprozessen liefern oder strategische Entscheidungen über den Aufbau neuer Geschäftsfelder unterstützen, die sich durch den Einstieg in neue Technologien eröffnen. Häufig besteht der Wunsch nach Technologieempfehlungen in Form von "Positiv-Negativ-Listen" oder "Technologierankings". Dabei ist jedoch zu beachten, daß eine aussagekräftige, quantitative Bewertung einer Technologie per se aufgrund der Abhängigkeit von zu vielen Randbedingungen nicht möglich ist. Statt dessen kann nur der jeweilige Einsatz einer Technologie zur Erfüllung einer konkreten Produktionsaufgabe, also die Anwendung der Technologie im Rahmen eines Prozesses, bewertet werden. Technologiebewertung erfordert somit die Vorgabe von Randbedingungen und einer möglichst repräsentativen Produktionsaufgabe, z.B. eines konkreten Produktspektrums als Bezugsobjekt. In der Praxis erfolgt deshalb häufig eine Beschränkung auf einzelne, repräsentative Produktbeispiele, um aus den hierfür ermittelten Ergebnisse verallgemeinernde Aussagen abzuleiten.

Aufgabe der Methode der Integrierten Bewertung im Rahmen einer allgemeinen Technologiebewertung ist die Ermittlung eines Prozeßsatzes zur Charakterisierung der Technologie und zur Bestimmung allgemeiner Vergleichsgrößen (s. Kap. 6.2.4). Die Ergebnisse können dann dazu verwendet werden, bei einer näheren Spezifikation einer Produktionsaufgabe eine überschlägige Kalkulation der zu erwartenden Umweltwirkungen und Produktionsprozeßkosten durchzuführen. Im Gegensatz zur betriebswirtschaftlichen Vorgehensweise der Kostenermittlung mittels pauschaler Zuschlagssätze auf Basis von Kostenarten oder mittels rein zeitbezogenen Proportionalisierungen wird bei der Methode der Integrierten Bewertung die Reagibilität der Flüsse besser abgebildet, da funktionale Zusammenhänge durch entsprechende Parameter berücksichtigt werden können. Der in dieser Arbeit entwickelte Prozeßsatz besteht daher aus zwei Komponenten, um sowohl Zeit- als auch Ausbringungsabhängigkeiten wiederzugeben (Abb. 40).

Ausbringungsabhängige Größen werden beispielsweise über Stückzahlen und andere Parameter zur Beschreibung der verbrauchsabhängigen bzw. potentialvermindernden Inanspruchnahme auf parametrisierte repräsentative Produkteinheiten bzw. prozeßspezifische Vergleichsgrößen verrechnet. Zeitab-

---

<sup>1</sup> Eine Berechnung von Amortisationsdauern oder internen Zinsfüßen ist nur dann möglich, wenn neben Kosten auch Erlöse vorliegen.

hängige Größen werden auf eine Kapazitätszeiteinheit, üblicherweise eine Stunde, bezogen, wobei die tatsächliche zeitliche Inanspruchnahme anstelle der theoretisch maximal verfügbaren Kapazität zu berücksichtigen ist.<sup>1</sup> Als Ergebnis der Verrechnung erhält man parametrisierte Sätze für Kosten und Umweltwirkungen anstelle fester Werte. Während der Zeitverrechnungssatz in der Regel relativ einfach auf eine Zeiteinheit bezogen werden kann, können für den Ausbringungssatz durchaus mehrere produkt- und produktionsaufgabenbeschreibende Parameter maßgeblich sein, so daß der Satz durchaus aus mehreren Komponenten bestehen kann<sup>1</sup>. Zur Erhöhung der Aussagekraft empfiehlt es sich jedoch, eine möglichst geringe Anzahl dominierender Parameter anzustreben und im übrigen repräsentative Werte zuzuweisen.

Für detailliertere Analysen und Kalkulationen ist eine weiterführende Differenzierung des Satzes nach Leistungsbereitschaft und Leistungserstellung denkbar. Entsprechend der Reagibilität der Flüsse, Kosten und Umweltwirkungen, würde der Prozeßsatz dann aus je einer zeitabhängigen und ausbringungsabhängigen Komponente für die Leistungsbereitschaft und die Leistungserstellung bestehen.

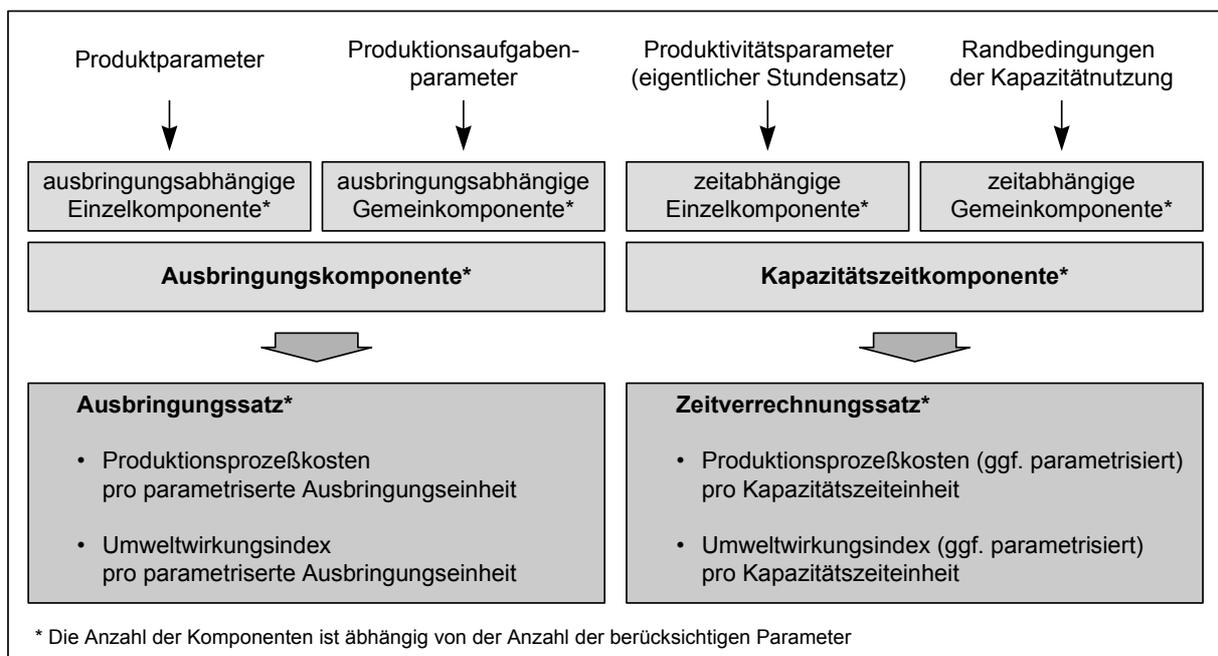


Abb. 40: Aufbau des Prozeßsatzes

Der Prozeßsatz ist eine universelle Ergebnisgröße zur Charakterisierung und Bewertung einer Produktionstechnologie, der auf typische Fragestellungen der taktischen Produktionsplanung angewandt werden kann (Abb. 41). Aufgrund der Abhängigkeit von mehreren Parametern sollte eine Entscheidung über einen Technologieeinsatz nach Möglichkeit vor dem Hintergrund eines oder mehrerer Produktionsszenarien erfolgen, bei denen Produktspektren und Randbedingungen der Produktionsaufgabe ent-

<sup>1</sup> Vgl. auch Kap. 6.2.4 für Bezugsgrößen und Verrechnungsprinzipien.

sprechend variiert werden. Die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisgrößen für Umweltwirkungsindex UWI und Produktionsprozeßkosten PPK können dann im Rahmen eines Umweltwirkungs- und Kostenvergleichs mit den Ergebnissen alternativer Technologien und Prozeßgestaltungen oder aber mit Zielvorgaben verglichen werden, um so die optimale Lösung zu identifizieren.

Weitere wichtige Anwendungsgebiete des Prozeßsatzes sind überschlägige Produktkalkulationen und Investitionsbewertungen, bei denen die Ergebnisgrößen Umweltwirkungsindex UWI und Produktionsprozeßkosten PPK für einen konkreten Anwendungsfall durch Spezifizierung der Ausbringungsparmeter (v.a. Produktparameter) und der zeitlichen Inanspruchnahme des Prozesses schnell berechnet werden können. Für Produktionsaufgaben, in denen sich das Produktspektrum nicht durch ein einzelnes Referenzprodukt ausdrücken läßt, muß die Rechnung für mehrere repräsentative Produkte wiederholt und aus den Ergebnissen eine Gesamtaussage abgeleitet werden.

Für ein sehr homogenes Produktspektrum (im Extremum handelt es sich um eine Ein-Produkt-Fertigung) besteht zudem die Möglichkeit, die Ausbringungskomponente des Prozeßsatzes in eine zeitabhängige Größe umzurechnen und auf diese Weise einen reinen, vollverrechneten Zeitsatz (Stundensatz) zu erhalten. Hierzu werden entweder die ausbringungsabhängigen Größen für ein repräsentatives Produkt spezifiziert und anschließend durch die benötigte Fertigungszeit dividiert, oder aber die Gesamtwerte für ein Produktspektrum werden auf eine Periode bezogen und durch die Anzahl der genutzten Kapazitätszeiteinheiten der Periode dividiert. Dies impliziert zwar eine Zwangsproportionalisierung über den Faktor Fertigungszeit, da eine derartige Vorgehensweise jedoch in der Betriebswirtschaftslehre üblich ist, ist dies zur Ermittlung überschlägiger Anhaltswerte vertretbar. Der entscheidende Vorteil liegt in der Einfachheit des auf diese Weise erhaltenen Prozeßsatzes, da er nur die Fertigungszeit als einzige Variable enthält. Solange der damit verbundene mögliche Fehler akzeptiert werden kann und auf ihn entsprechend hingewiesen wird, kann die erhaltene Ergebnisgröße durchaus im Sinne eines Technologierankings verwendet werden. Allerdings ist zu bedenken, daß es sich dann nicht um ein allgemeingültiges Ranking handelt, sondern die Aussagen nur für die zugrunde gelegte Produktionsaufgabe gelten.

Abgesehen von dieser Vollverrechnung bedeutet die Abhängigkeit des Prozeßsatzes von mehreren Parametern, daß eine allgemeingültige Aussage in Form einer einzigen Kennzahl zur Beschreibung der ökologischen bzw. ökonomischen Konsequenzen nicht möglich ist. Hierbei handelt es sich jedoch um ein grundsätzliches Problem der Technologiebewertung. Allerdings ist es mit Hilfe des Prozeßsatzes möglich, durch Parametervariation diejenigen Produkte und Randbedingungen zu identifizieren, bei denen ein Einsatz der bewerteten Technologie vorteilhaft ist.

---

<sup>1</sup> In der exemplarischen Anwendung in Kap. 9 besteht die Ausbringungskomponente z.B. aus einer parametrisierten bauteilgewichtabhängigen sowie einer produktartspezifischen Komponente.

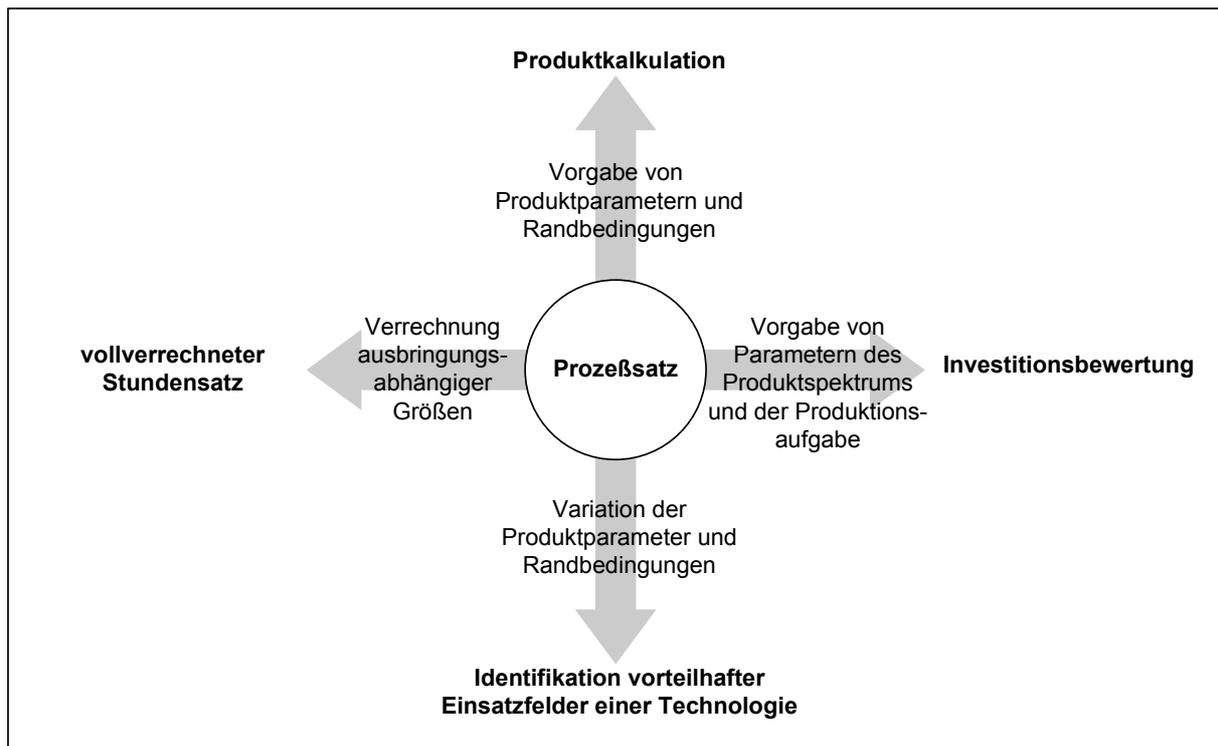


Abb. 41: Anwendungsmöglichkeiten des Prozeßsatzes

## 8.2 Vorgehensweise zur Anwendung der Methode

In Kap. 2.1 wurde eine Bewertungsmethode definiert als ein planmäßiges Vorgehen, das regelt, wie die Einflußgrößen der Bewertung gewonnen, strukturiert und mit Hilfe einer Bewertungslogik zu einer Bewertungsaussage verknüpft werden können. Als Ausdruck der Werthaltung dienen bei der Methode der Integrierten Bewertung die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Bewertungskriterien, -größen und Gewichtungsfaktoren. Die Erfassung und Aufbereitung der Daten geschieht verursachungsgerecht und unter Berücksichtigung der Reagibilität im Rahmen der Grundrechnung und nach den in Kap. 6 dargelegten Prinzipien der Umweltwirkungs- und Kostenartenrechnung. Mit der Auswertungsrechnung (s. Kap. 7) erfolgt die Verknüpfung von Informationen und Werthaltung zu den zwei eigenständigen Ergebnisgrößen Umweltwirkungsindex UWI und Produktionsprozeßkosten PPK. Zur Umsetzung der Bewertungslogik in der Praxis dient die Abb. 42 dargestellte Vorgehensweise, deren einzelne Schritte nachfolgend beschrieben werden.

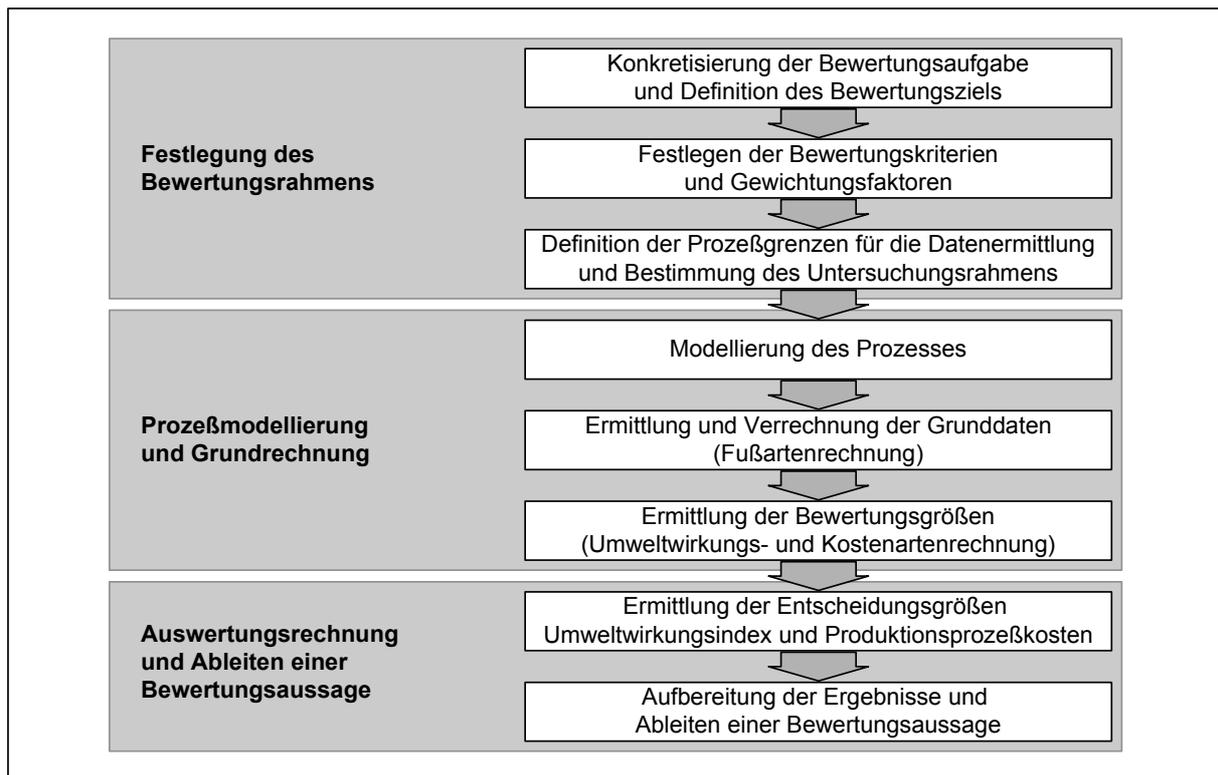


Abb. 42: Vorgehensweise zur Anwendung der Methode der Integrierten Bewertung

### 8.2.1 Festlegung des Bewertungsrahmens

Zu Beginn der Bewertung ist die Bewertungsaufgabe zu konkretisieren und das genaue Bewertungsziel zu definieren. Hierzu gehört die exakte Bestimmung des Bewertungsobjekts, d.h. welcher Prozeß bzw. welche Technologie zu untersuchen ist und welche Randbedingungen zugrunde zu legen sind.<sup>1</sup> Mit der Definition des Bewertungsziels wird nicht nur die Erwartungshaltung an Inhalt und Detaillierung der angestrebten Bewertungsaussage formuliert, sondern auch die Ausprägungsform der Bewertung festgelegt. D.h. es ist zu entscheiden, ob eine Produkt- bzw. Prozeßkalkulation, eine Investitionsbewertung oder eine Technologiebewertung durchzuführen ist, da mit der Bestimmung der Ausprägungsform der Bewertung auch die zeit- und trägerbezogenen Bezugsgrößen für die spätere Grund- und Auswertungsrechnung determiniert werden (s. auch Kap. 6.2.4). Im Fall einer vergleichenden Betrachtung sind zudem mögliche Handlungsalternativen festzulegen und zu untersuchen, inwieweit für diese Daten vorhanden sind oder zusätzlich erhoben werden müssen. Dabei ist sicherzustellen, daß die Ergebnisse vergleichbar und für eine Entscheidungsfindung geeignet sind.

<sup>1</sup> Beispielsweise kann ein angestrebtes Bewertungsergebnis eine Entscheidungsgrundlage über den Einsatz einer Technologie für eine bestimmte Produktionsaufgabe sein.

Mit der Definition des zu bewertenden Prozesses und des Untersuchungsrahmens werden die Prozeßgrenzen für die Datenermittlung der direkten Flüsse und damit der Umfang der Flußartenrechnung festgelegt. Um die erforderlichen Daten möglichst zielgerichtet und aufwandsarm ermitteln zu können, ist zudem eine frühzeitige Definition der Bewertungskriterien erforderlich. Ihre Auswahl sollte sich an den in Kap. 5.2 genannten Größen orientieren, wobei zusätzlich unternehmensspezifische Vorgaben berücksichtigt werden können. Darüber hinaus ist der Untersuchungsrahmen für die ökologische Bewertung festzulegen und zu bestimmen, wie und in welchem Umfang innerbetrieblicher Leistungen verrechnet und Erlöse einbezogen werden sollen. Zusätzlich sollten bereits in dieser Phase die Gewichtungsfaktoren für die spätere Aggregation der Wirkungskategorien festgelegt werden, um die Relevanz einzelner Flüsse bereits bei der Datenermittlung besser beurteilen zu können.

### **8.2.2 Prozeßmodellierung und Grundrechnung**

Nach der Definition des Bewertungsrahmens erfolgt die Modellierung des Prozesses. Mit der Beschreibung der Prozeßschritte und ihrer jeweiligen Prozeßleistungen<sup>1</sup> sowie der Ermittlung der verursachten bzw. zurechenbaren In- und Outputs (Stoff-, Energie- und sonstige Produktionsfaktorflüsse) unter Differenzierung der in Kap. 6.2 aufgeführten Flußarten entsteht zunächst ein qualitatives Abbild des Prozesses.

Anschließend sind die Flüsse den Umweltwirkungsarten und Kostenarten in Form einer Matrix (s. Abb. 16 in Kap. 6.1) zuzuordnen (Klassifizierung). Mit der Zuweisung der Charakterisierungsfaktoren (z.B. aus Datenbanken) und Verrechnungspreise zu den Flußarten entsteht daraus die Wirkungsfaktorenmatrix (WFM). Unter Berücksichtigung der entsprechenden Gewichtungsfaktoren für die Wirkungskategorien ist es möglich, die Relevanz der einzelnen Flüsse bereits frühzeitig einzuschätzen und den Ermittlungsaufwand auf die wichtigsten entscheidungsrelevanten Flüsse zu konzentrieren. Hierzu lassen sich folgende allgemeingültige Relevanzregeln aufstellen:

- Ein Fluß ist aus ökologischer Sicht um so relevanter, je größer seine Flußgröße ist, je mehr Wirkungskategorien er zugeordnet werden kann, je größer die Gewichtungsfaktoren der ihm zugeordneten Umweltwirkungsarten sind und je stärker er einzelne Umweltwirkungsarten dominiert.
- Ein Fluß ist aus ökonomischer Sicht um so relevanter, je größer seine Flußgröße ist, je größer der ihm zugeordnete Verrechnungspreis ist und je stärker er eine Kostenart dominiert.
- Ein Fluß ist für die Gesamtbewertung um so relevanter, je größer seine ökologische und seine ökonomische Relevanz sind.

---

<sup>1</sup> Die Prozeßleistung entspricht dem funktionalem Äquivalent in der Sachbilanz nach [DIN EN ISO 14040].

Diese Relevanzeinschätzung sollte sowohl für die einzelnen Umweltwirkungs- und Kostenarten, als auch kriterienübergreifend erfolgen.

Im Anschluß an die Ermittlung der Daten erfolgt ihre Verrechnung auf die Bezugsgröße unter Berücksichtigung ihrer Reagibilität (s. Kap. 6.2.3) und die Berechnung der Umweltwirkungsindikatorergebnisse und Kosten im Rahmen der Umweltwirkungs- und Kostenartenrechnung (s. Kap. 6.2.4). Bei einer dynamischen Investitionsbewertung ist die Rechnung mehrfach zu durchlaufen, um die einzelnen Periodenergebnisse zu ermitteln.

### **8.2.3 Auswertungsrechnung und Ableiten einer Bewertungsaussage**

Entsprechend dem in Kap. 5 entwickelten Konzept ist die Ermittlung der ökologischen und die ökonomischen Ergebnisgrößen durch jeweils eigene, auf die spezifischen Anforderungen angepaßte Bewertungslogiken gekennzeichnet. In der ökologischen Auswertungsrechnung erfolgt mit den Schritten Normalisierung, Gewichtung und Aggregation eine Verdichtung der Umweltwirkungen zur Entscheidungsgröße Umweltwirkungsindex UWI, während im Rahmen der ökonomischen Auswertungsrechnung die Ergebnisgröße der Produktionsprozeßkosten PPK berechnet wird. In Abhängigkeit von Bewertungsziel, angestrebter Aussage und Bezugsgröße erfolgt die Verrechnung in beiden Fällen entweder trägerbezogen, zeitorientiert oder in Form eines Prozeßkostensatzes.

Auch wenn sich umweltorientierte und betriebswirtschaftliche Auswertungsrechnungen hinsichtlich der zum Einsatz kommenden Bewertungslogik unterscheiden, so erfolgen dennoch beide nach den gleichen Auswertungsprinzipien und verwenden dieselbe prozeßbeschreibende Datenbasis (Abb. 43). Auf diese Weise sind eine konsistente Verrechnung der Grunddaten und eine Durchgängigkeit zwischen ökologischer und ökonomischer Auswertung gewährleistet. Die Ergebnisgrößen können zueinander in Bezug gesetzt werden, um eine ganzheitliche Bewertungsaussage zu erhalten, und sie können hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und dominierender Einflußfaktoren analysiert werden.

Zur Interpretation der Ergebnisse und zur Ableitung einer Bewertungsaussage ist ein Vergleich mit Handlungsalternativen oder absoluten Maßstäben erforderlich. Denn nur durch einen Vergleich ist es möglich, die Bewertungsergebnisse in ihrer Bedeutung richtig einzuordnen und eine rationale Entscheidung im Sinne der Zielstellung abzuleiten.

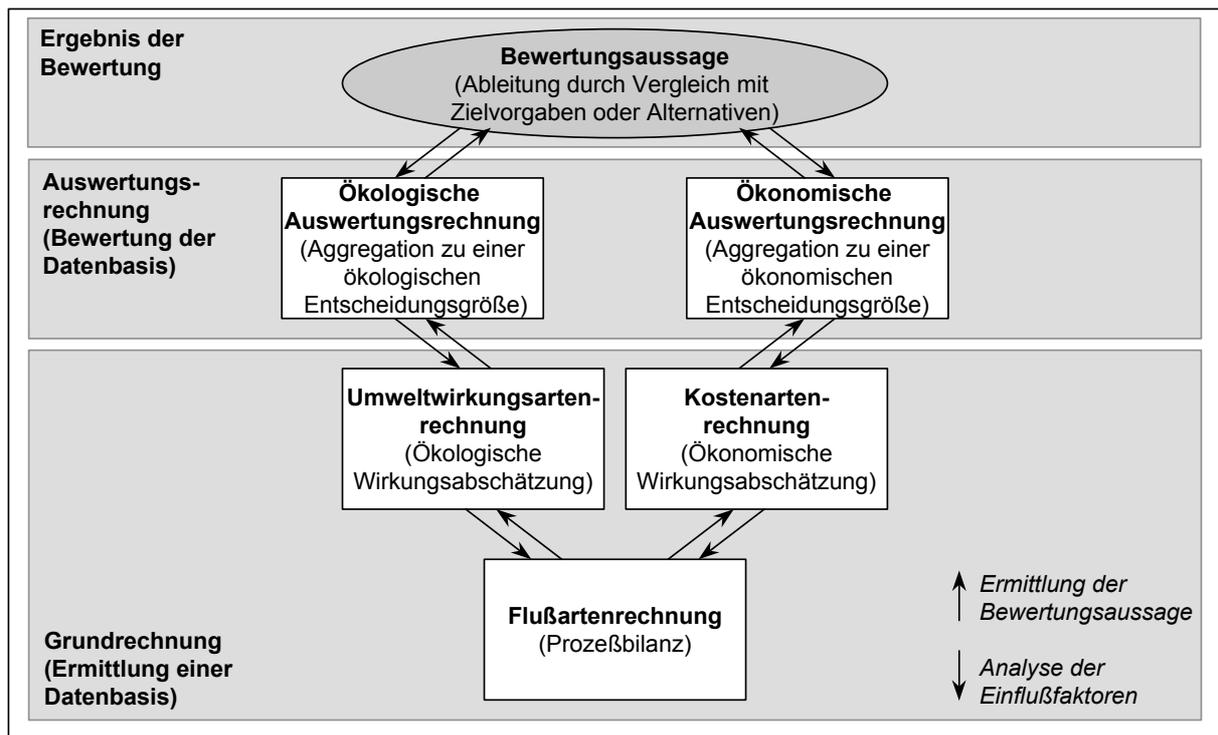


Abb. 43: Ableitung einer ganzheitlichen Bewertungsaussage

Als Vergleichsbasen eignen sich alternative Prozesse bzw. Technologien zur Erstellung der gleichen Prozeßleistung ("relative" Bewertung), Referenzprozesse ("relative" Bewertung) oder Zielvorgaben, wie z.B. Kosten- und Umwelttargets ("absolute" Bewertung). Eine Beibehaltung des Status-quo, Nicht-Investition oder der Einsatz etablierter, konventioneller Technologien stellen ebenfalls Handlungsalternativen dar und können daher auch als Vergleichsbasen herangezogen werden. Notwendige Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit ist jeweils, daß die Referenzwerte unter Verwendung gleichwertiger Bezugsgrößen, Untersuchungsrahmen und Erfassungssystematik sowie derselben Normalisierungsbasen und Gewichtungsansätze ermittelt wurden.

Abb. 44 zeigt eine mögliche Form zur Darstellung der Ergebnisse dieses Vergleichs für ein fiktives Beispiel. Bezieht man die Ergebnisse der einzelnen Alternativen auf die Werte des gewählten Referenzprozesses (100%-Marke) oder auf eine Zielvorgabe (Target), so werden die Größenordnungen der Vor- und Nachteile der einzelnen Alternativen deutlich. Gegebenenfalls können auch Toleranzgrenzen eingetragen werden, bis zu denen ökologische bzw. ökonomische Nachteile akzeptiert werden, solange sich für die andere Zielgröße ein deutlicher Vorteil ergibt. In dem dargestellten Beispiel ist B die insgesamt ausgewogenste Alternative. Bei einer entsprechend hohen Priorisierung des Themas Umweltschutz wäre allerdings zu prüfen, ob gegebenenfalls der leichte Kostennachteil der Alternative A akzeptiert werden kann, da sich hier ein deutlicher ökologischer Vorteil ergibt.

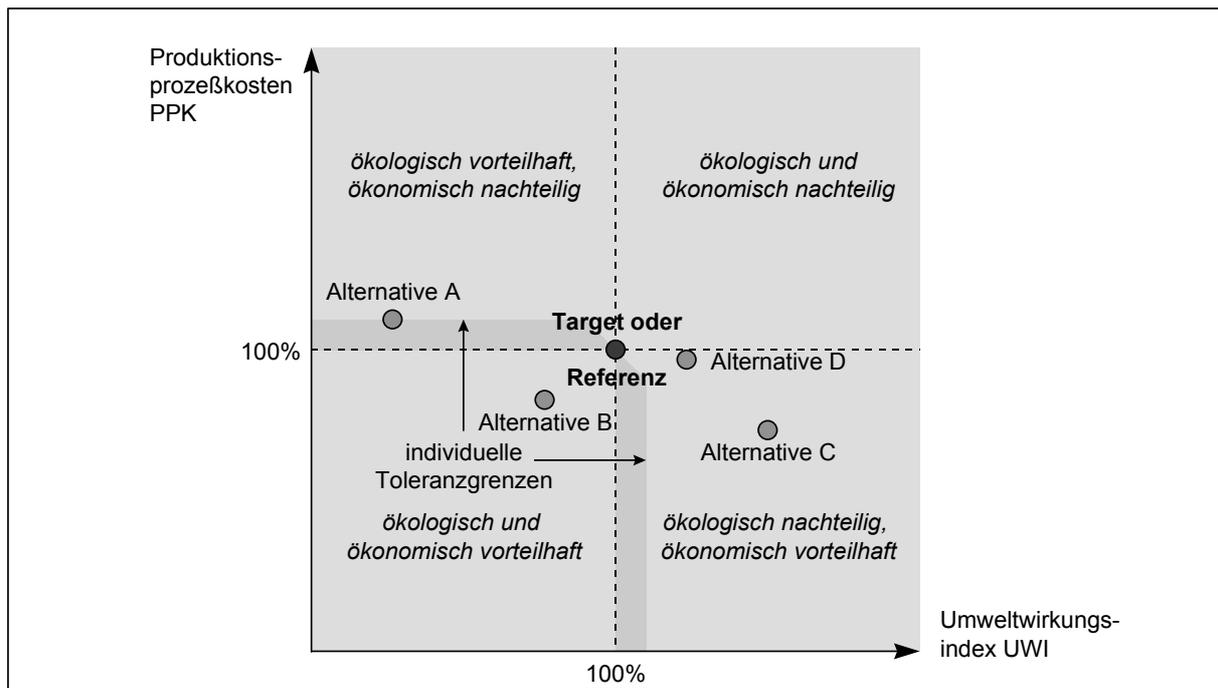


Abb. 44: Exemplarische Aufbereitung der Ergebnisse zur Ableitung einer Bewertungsaussage

### 8.3 Einordnung und Abgrenzung der Methode der Integrierten Bewertung

Mit der Integrierten Bewertung steht eine Methode zur Verfügung, mit der sich Produktionsprozesse und -technologien zugleich hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt und ihrer Kosten bewerten lassen. Zur Verknüpfung von ökologischer und ökonomischer Bewertung wurden Elemente bestehender Ansätze der Kostenrechnung und Ökobilanzierung konsequent weiterentwickelt und miteinander verknüpft. Im Unterschied zu bekannten Methoden ist die Integrierte Bewertung jedoch explizit für Fragestellungen des Produktionsmanagements, insbesondere der taktischen Produktionsplanung, konzipiert und zeichnet sich durch eine starke Prozeßorientierung aus (Tab. 17).

	Methode der Integrierten Bewertung	Produkt-ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff	Methode nach Stahl	Teilkostenrechnung	Ressourcenorientierte Prozeßkostenrechnung	Kostenvergleichsrechnung
<b>Anwendungsgebiet (Aufgaben des Produktionsmanagements)</b>						
Entwicklung neuer Produktionstechnologien	(X)					
Bewertung neuer Produktionstechnologien	X					(X)
Planung von Prod.prozessen/ Investitionsentscheidungen	X	(X)	(X)		(X)	X
Optimierung bestehender Prozesse	X	X	X	X	X	X
<b>Konzeption</b>						
Produktorientierung	X	X	X	X		X
Prozeßorientierung	X	(X)	(X)		X	(X)
Quantifizierung der Umweltwirkungen	X	X	X		(X)	
Bewertung der Umweltwirkungen	X	(X)	X			
Quantifizierung der Kosten	X			X	X	X
Bewertung der Kosten	X					X
Verursachungsgerechte Datenermittlung	X	(X)	(X)	X	X	(X)
<b>Bewertungslogik</b>						
Transparenz und Nachvollziehbarkeit	X	X	X	X	X	X
Verdichtung der Ergebnisse	X	(X)	X	X		X
Entscheidungsunterstützung	X	(X)	(X)			X
<b>Integration</b>						
Integration von ökologischer und ökonomischer Bewertung	X					
Aufzeigen von Zus.hängen zw Kosten und Umweltwirkungen	X					
Aufzeigen v. Einflußfaktoren auf Kosten bzw. U.wirkungen	X	(X)	(X)		X	
X	Anforderung im wesentlichen erfüllt					
(X)	Anforderung ansatzweise erfüllt / Methode prinzipiell geeignet (Modifikation bzw. Weiterentwicklung erforderlich)					
	Wesentliche Defizite bestehender Methoden hinsichtlich einer integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien					

Tab. 17: Abgrenzung der Methode der Integrierten Bewertung

Ein wesentliches Herausstellungsmerkmal der in dieser Arbeit entwickelten Methode ist die Konzeption des Integrierten Rechnungswesens mit den Komponenten Grund- und Auswertungsrechnung zur Trennung von Sach- und Wertebene und die Verwendung eines Integrierten Prozeßmodells zur Ermitt-

lung einer gemeinsamen Datenbasis für die Flußarten-, Umweltwirkungsarten- und Kostenartenrechnung (Abb. 45).

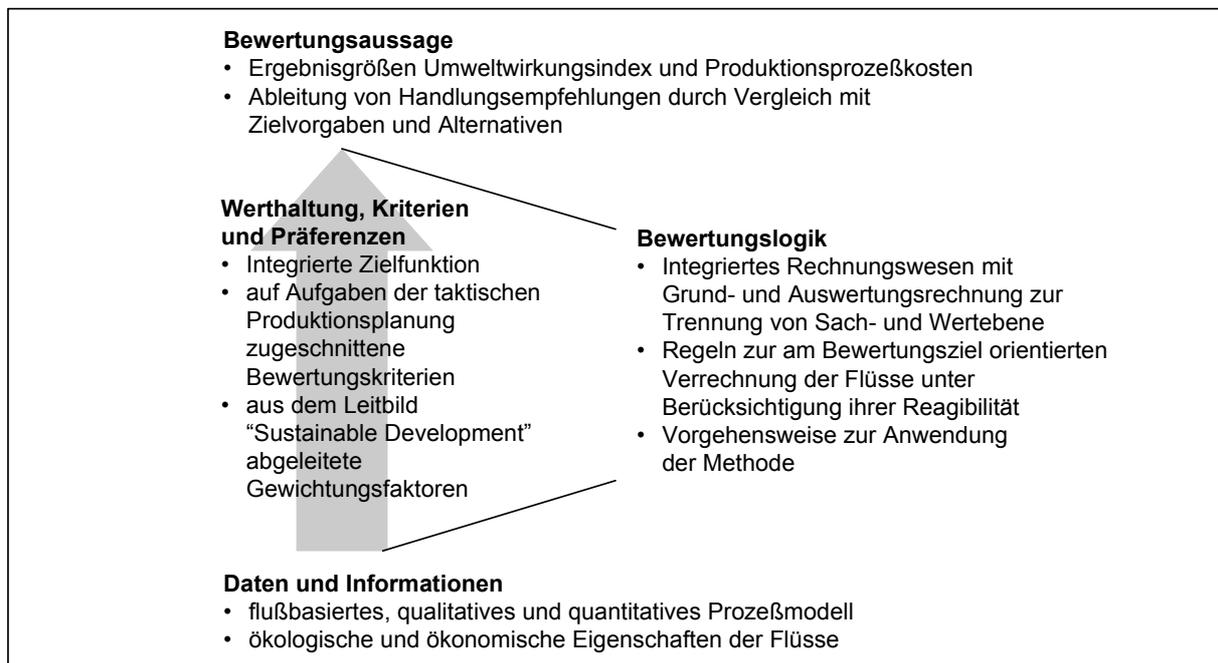


Abb. 45: Charakteristische Elemente der Methode der Integrierten Bewertung

Durch die differenzierte Berücksichtigung der zeitlichen und ausbringungsbezogenen Reagibilität und durch die bewertungszielorientierte Zurechnung von Gemeinflüssen wird dem Verursachungsprinzip nachdrücklich Rechnung getragen. Insbesondere für das Gebiet der Ökobilanzierung wird mit den in Kap. 6.2.5 beschriebenen Regeln für eine verursachungsgerechte Verrechnung von Gemeingrößen auf eine Bezugsgröße eine wichtige methodische Weiterentwicklung geleistet, da diese Problematik bislang nicht thematisiert wurde. Zugleich bedeutet dies auch eine Abkehr von der im betrieblichen Rechnungswesen üblichen Vorgehensweise, Größen nur hinsichtlich einer der beiden Reagibilitätsgrößen zu proportionalisieren und einem Leistungsträger nicht direkt zurechenbare Größen undifferenziert zu einem Gemeinkostenblock zusammenzufassen. Statt dessen erfolgt bei der Methode der Integrierten Bewertung eine Verrechnung der Flußgrößen auf die in der späteren Auswertungsrechnung zum Tragen kommende Bezugsgröße bereits in der Grundrechnung. Neben einer stärkeren Orientierung der gesamten Rechnung am späteren Bewertungsziel besteht der wesentliche Vorteil darin, daß Größen in diesem frühen Stadium noch entsprechend ihrer tatsächlichen Reagibilität ihren Verursachern zugerechnet werden können. Pauschale Proportionalisierungen, wie bei der im betrieblichen Rechnungswesen üblichen periodenbezogenen Ermittlung und Verrechnung über nicht-verursachungsgerechte Zuschlagssätze, können vermieden werden, da die zum Einsatz kommenden Verrechnungsparameter auf technisch-prozessuale Zusammenhänge und nicht auf Metagrößen, wie z.B. Kosten, zurückgeführt werden.

Insgesamt resultiert die Sachorientierung nicht nur in einer durchgängigen und vor allem konsistenten Datengrundlage, sondern ermöglicht es auch, eine ökologische und ökonomische Bewertung gleichberechtigt nebeneinander zu stellen, ohne daß eine der beiden Betrachtungsweise dominiert.

Die Verknüpfung von Daten und Werthaltungen in der Methode der Integrierten Bewertung orientiert sich an allgemein konsensfähigen Ansätzen, wobei die von der Ökobilanzierung her bekannte Form der Wirkungsabschätzung und Aggregation und Elemente der Kostenarten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung verwendet werden. Allerdings wurden mit dem Umweltwirkungsindex UWI und dem Prozeßkostensatz neue und zugleich anschauliche Ergebnisgrößen definiert, die auf die Aufgabenstellungen des Produktionsmanagements zugeschnitten sind.

Mit den zuvor dargestellten Ausprägungsformen der Methode ist eine Anpassung der Grund- und Auswertungsrechnung an die spezifischen Besonderheiten der jeweiligen Bewertungsaufgaben möglich, um eine optimale Entscheidungsunterstützung zu leisten. In Tab. 18 sind die hieraus resultierenden Anknüpfungspunkte der Methode der Integrierten Bewertung zu bestehenden Konzepten zusammengefaßt.

Ausprägungsform	Bezugsgröße der Grund- u. Auswertungsrechnung	Unterstützte Methoden des	
		Umweltmanagements	Kostenmanagements
<b>Produkt- bzw. Prozeßkalkulation</b>	Produkteinheit bzw. Prozeßleistung	(Komponenten einer) Produktökobilanz	Kostenträgerrechnung, Prozeßkostenrechnung
<b>Investitionsbewertung</b>	Nutzungsphase einer Investition (mehrperiodige Betrachtung)	ökologische Buchhaltung im Rahmen des Öko-Controlling	Ermittlung des Periodenergebnisses, Investitionsrechnung
<b>Technologiebewertung</b>	parametrisierte Produkteinheit/Prozeßleistung bzw. Kapazitätszeiteinheit	(bislang keine vergleichbare Methode bekannt)	Weiterentwicklung der Maschinenstundensatzrechnung

Tab. 18: Anknüpfungspunkte der Methode der Integrierten Bewertung zu bestehenden Konzepten

## **9 Exemplarische Anwendung der Methode der Integrierten Bewertung zur Technologiebewertung des Magnesiumspritzgießens**

Gegenstand dieses Kapitels ist die exemplarische Anwendung der entwickelten Methode. Am Beispiel einer Technologiebewertung werden die Vorgehensweise und der konkrete Einsatz der entwickelten Komponenten der Grund- und Auswertungsrechnung vorgestellt. Für die neue Produktionstechnologie des Magnesiumspritzgießens (Thixomolding) wird ein Prozeßsatz ermittelt und den Werten für Magnesiumdruckgießen als etabliertem Verfahren gegenübergestellt. Mit der Aufbereitung der Ergebnisse und einer Analyse der Entwicklungspotentiale wird eine Entscheidungsgrundlage über den Einsatz der neuen Technologie gelegt.

### **9.1 Hintergrund**

Vor dem Hintergrund der Selbstverpflichtung der deutschen Automobilindustrie zur Senkung des Flottenverbrauchs von Neufahrzeugen im Zeitraum von 1995-2005 um 25% erfährt der Werkstoff Magnesium derzeit eine Renaissance im Automobilbau, da die Verringerung des Fahrzeuggewichts die größten Potentiale zur Verbrauchs- und Emissionsreduzierung von Kraftfahrzeugen bietet [Jülich 2001; AZ 2000; Engelhart 1999; Eberle 1999]. Neben einem Gewichtseinsparungspotential von bis zu 34% gegenüber Aluminiumlösungen und bis zu 75% gegenüber Stahl zeichnet sich der Werkstoff durch eine gute Vergießbarkeit zur Herstellung komplexer und dünnwandiger Bauteile sowie durch eine gute mechanische Bearbeitbarkeit aus. Hinzu kommt, daß der Rohstoff für die Magnesiumherstellung in nahezu unbegrenzter Menge als Mineral und im Meerwasser vorhanden ist und das Material gut recycelbar ist. Im Kraftfahrzeug werden Magnesiumlegierungen vor allem für Bauteile im Innenraum, wie z.B. Lenkräder, Zündanlaßschloßgehäuse, Instrumententafelträger und Sitzgestelle, sowie im Aggregatbereich, wie z.B. für Getriebegehäuse, Zylinderkopfhauben, Ansaugrohre und Ölwannen, eingesetzt. Anwendungen aus dem Karosseriebereich, wie z.B. Komponenten für Türen und Klappen oder Strukturbauteile, sind bislang wenig verbreitet, da dort die mechanischen Anforderungen zum Teil sehr hoch sind [Edgar 2000; Hydro 1997].

In Anbetracht jährlicher Wachstumsraten des Magnesiumeinsatzes von über 25% in den vergangenen Jahren und einem erwarteten Anstieg von weiteren 10-15% pro Jahr wird die konsequente Weiterentwicklung der Herstell- und Fertigungsverfahren bei der Lösung der aktuellen ökologischen und ökonomischen Herausforderungen immer wichtiger [Jülich 2001; Edgar 2000]. In diesem Zusammenhang erfährt das Magnesiumspritzgießen als neue Produktionstechnologie zunehmendes Interesse (Abb. 46), zumal es eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem Druckgießen als Stand der Technik bietet.

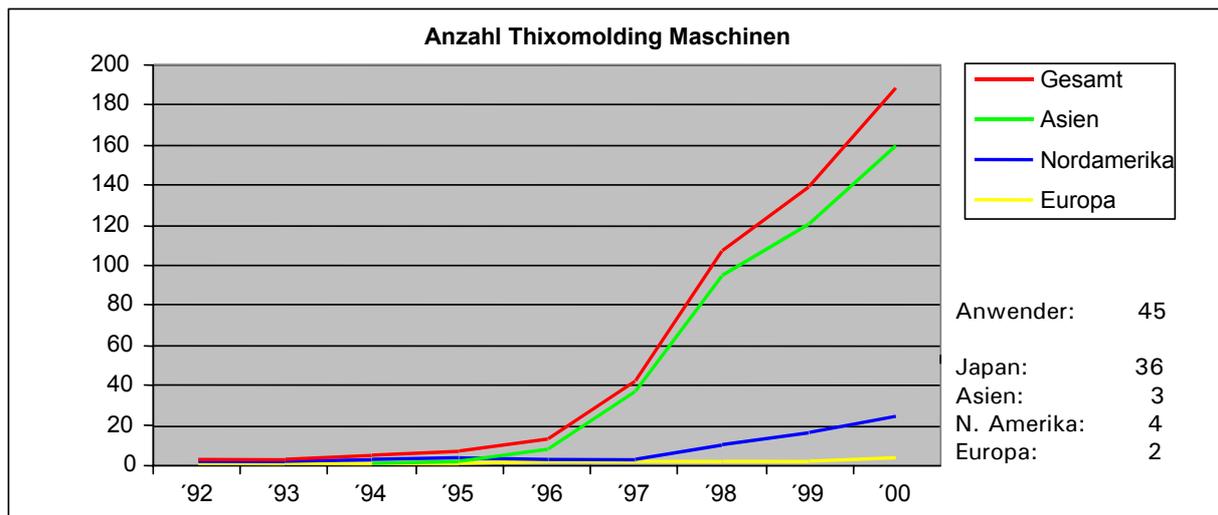


Abb. 46: Entwicklung und Verbreitung der Technologie des Magnesiumspritzgießens

Im Unterschied zum Druckgießen erfolgt die Verarbeitung von Magnesiumlegierungen beim Magnesiumspritzgießen nicht schmelzförmig, sondern im teilflüssigen, thixotropen Zustand.<sup>1</sup> Durch die niedrigere Viskosität ergibt sich ein gleichmäßigeres Formfüllverhalten, das höhere Bauteilqualitäten (geringere Porosität, höhere Oberflächenqualität) und bessere mechanische Kennwerte ermöglicht. Das im Vergleich zum Druckgießen um ca. 100°C niedrigere Temperaturniveaus ermöglicht geringere Bauteilschrumpfung und -verzüge, eine verminderte Heißrißneigung, längere Standzeiten der Formwerkzeuge, die Einhaltung engerer Maßtoleranzen, eine Net-Shape-Fertigung mit minimierter spanenden Nachbearbeitung und einen geringeren Energieverbrauch bei der Bauteilherstellung [LeBeau 1998; Saito 1996; Carnahan 1995]. Ein wichtiger ökologischer Vorteil ist, daß durch den geschlossenen einstufigen Prozeß ohne Schmelzmetallurgie auf die beim Druckgießen übliche Verwendung des Treibhausgases SF<sub>6</sub> als Schutzgas verzichtet werden kann. SF<sub>6</sub> wurde 1997 bei der Weltklimakonferenz in Kyoto aufgrund seines hohen Treibhauspotentials von 23.900 CO<sub>2</sub>-Äquivalenten<sup>2</sup> und einer Lebensdauer in der Atmosphäre von 3.200 Jahren auf die Liste der Gase gesetzt, deren Gebrauch einzuschränken ist [Schubert 2000].

Aufgrund der noch geringen Verbreitung der Technologie und des begrenzten verfügbaren Know-Hows besteht andererseits neben den genannten Vorteilen Unklarheit bezüglich der Kosten und der Wirtschaftlichkeit des Magnesiumspritzgießens. Zum einen ist die Prozeßstabilität aufgrund mangelnder Erfahrung schwer einschätzbar und zum anderen führen hohe Maschinenkosten, Lizenzgebühren und die Abhängigkeit von weltweit nur zwei Anlagenherstellern zu Unsicherheit bezüglich der zu erwartenden Prozeßkosten [Dworog 2001; Dworog 1999a]. Vor diesem Hintergrund hat sich die

<sup>1</sup> Thixotropie bedeutet, daß Metalle im teilflüssigen Zustand ein strukturviskoses Verhalten aufweisen., bei dem die Viskosität des Phasengemischs eine Funktion der Temperatur, Schergeschwindigkeit und Scherdauer ist. Mit zunehmender Temperatur, Schergeschwindigkeit und Scherdauer sinkt die Viskosität. [Hepp 1999].

<sup>2</sup> D.h. 1 kg SF<sub>6</sub> besitzt die gleiche Treibhauswirkung wie 23,9 to CO<sub>2</sub>.

Volkswagen AG an den vom BMBF geförderten Projekten MADICA und MATALEND beteiligt, um die Risiken und Potentiale der neuen Technologie zu ermitteln und zu bewerten.<sup>1</sup>

## 9.2 Festlegung des Bewertungsrahmens

Ziel der Anwendung der Methode der Integrierten Bewertung ist es, für das neue Produktionsverfahren Magnesiumspritzgießen im Rahmen einer Technologiebewertung eine Entscheidungsgrundlage hinsichtlich des Einsatzes der Technologie für bestimmte Produktionsaufgaben zu schaffen. Als Ergebnis soll ein allgemeiner Prozeßsatz mit Ausbringungs- und Zeitverrechnungskomponente ermittelt werden, um die mit dem Einsatz des Verfahrens verbundenen Umweltwirkungen und Kosten zu quantifizieren. Für die Interpretation der Ergebnisse wird das Verfahren Druckgießen als Stand der Technik und als Referenz herangezogen.

Die Ermittlung des Prozeßsatzes erfolgt auf Basis von im Rahmen des Projektes MADICA ermittelten Daten für ein Schaltgehäuse aus Magnesium (Abb. 47), das aufgrund seiner Abmessungen, Dünnwandigkeit und Komplexität sowie hinsichtlich der zur Herstellung erforderlichen Maschinengröße eine repräsentative, potentielle Anwendung des Magnesiumspritzgießens im Automobilbereich darstellt.<sup>2</sup>



Abb. 47: Referenzbauteil zur Ermittlung der Datengrundlage (Schaltgehäuse)

<sup>1</sup> "MADICA - Sichere Produktionsprozesse für die Magnesiumver- und -bearbeitung", gefördert durch das BMBF im Rahmen des Programms "Produktion 2000", Teilprojekt Verfahrensentwicklung Magnesiumspritzgießen, Laufzeit 1996-2000. "MATALEND - Werkstoff- und Verfahrenstechnik für das Metallspritzgießen von neuen kriechbeständigen Magnesiumlegierungen", gefördert durch das BMBF im Rahmen des Programms "MaTech - Neue Materialien für Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts", Laufzeit 2000-2003.

<sup>2</sup> Die Angaben für das Magnesiumspritzgießen wurden im Rahmen des MADICA-Teilprojekts "Verfahrensentwicklung Magnesiumspritzgießen" erarbeitet. Für den Druckgießprozeß und die Rohmaterialherstellung wurde auf Ergebnisse des Teilprojekts "Druckguß" zurückgegriffen, zum Teil auch dargestellt in den vom Autor betreuten Diplomarbeiten von [Petmecky 1998] und [Grimminger 2000].

Zur Ableitung einer allgemeingültigen Bewertungsaussage sind die erfaßten Flußgrößen auf zeit- und ausbringungsabhängige Bezugsgrößen zu verrechnen (s. Ausführungen in Kap. 6.2.8 und 8.1.3), wobei die Daten auf eine Kapazitätszeiteinheit (1 Stunde) als zeitliche Bezugsgröße und auf ein fiktives repräsentatives Gußstück von 1 kg Rohteilgewicht bezogen werden.<sup>1</sup> Die auf diese Weise ermittelten Ergebnisse können dann im Rahmen technologie-, anlagen- und produktabhängiger Übertragungsgrenzen, wie z.B. Maschinengröße oder Bauteilklassen, als Kalkulationsgrundlage für andere Bauteile herangezogen werden. In einer Analyse der Ergebnisse sind zudem wichtige Einflußfaktoren auf die Ergebnisgrößen Umweltwirkungsindex und Produktionsprozeßkosten zu ermitteln und diejenigen Randbedingungen aufzuzeigen, unter denen die einzelnen Technologiealternativen vorteilhaft sind.

Neben der Verwendung des Prozeßsatzes als Kalkulationsgrundlage für die Auswahl des optimalen Gießverfahrens für ein konkretes Magnesiumbauteil können die Ergebnisse auch als Datengrundlage für Investitionsentscheidungen genutzt werden. Einen ausgeprägten strategischen Charakter bekommt die Bewertung im Falle einer Entscheidungsunterstützung hinsichtlich des Einstiegs in die neue Technologie, um Thixomoldingbauteilen am Markt anbieten zu können. Darüber hinaus können die Ergebnisse auch für rein umweltbezogene Betrachtungen im Rahmen von Ökobilanzen zum Einsatz von Magnesiumbauteilen im Kraftfahrzeug herangezogen werden.

Die Auswahl der Bewertungskriterien und Gewichtungsfaktoren für die exemplarische Anwendung der Methode erfolgt auf Basis der bereits 1995 verabschiedeten Konzernumweltpolitik von Volkswagen. Als weltweit agierender Konzern ist sich das Unternehmen seiner besonderen gesellschaftlichen Verantwortung bewußt und bekennt sich ausdrücklich zum Leitbild der Nachhaltigen Entwicklung (Sustainable Development). Gemäß den Grundsätzen der Umweltpolitik ist es das erklärte Ziel von Volkswagen, bei allen Aktivitäten die Einwirkungen auf die Umwelt so gering wie möglich zu halten und im Rahmen der eigenen Möglichkeiten an der Lösung der globalen und regionalen Umweltprobleme mitzuwirken. Das Unternehmen erforscht und entwickelt daher ökologisch effiziente Produkte und Prozesse und unterwirft sie einem kontinuierlichen Verbesserungsprozeß unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte. Ziel der Produktion ist in diesem Zusammenhang die kontinuierliche Verbesserung der Umweltverträglichkeit der Produktionsprozesse und -verfahren, die Schonung der natürlichen Ressourcen und die emissionsarme Fabrik [VW 2001, VW 1999a; VW 1997, VW 1995].

Unter Berücksichtigung der Ausführungen in Kap. 5.2 werden daher die in Tab. 19 zusammengefaßten Umweltwirkungs- und Kostenarten als Bewertungskriterien herangezogen.

Vor dem Hintergrund der Orientierung Volkswagens am Leitbild "Sustainable Development" erfolgt die Gewichtung der Umweltwirkungsarten mit den in Kap. 7.2.2 dargestellten Faktoren (Abb. 49).

---

<sup>1</sup> Die Bezugsgrößen 1 kg und 1 h dienen lediglich als Parameter für eine spätere Verwendung des Prozeßsatzes, vgl. Kap. 8.1.3. An dieser Stelle kann ein Rohteilgewicht von 1 kg so interpretiert werden, daß es sich hierbei um ein Bauteil von 1 kg Masse oder um zwei Bauteile mit je 0,5 kg Masse handelt, die in einem zweikavitäten Werkzeug gegossen werden.

Umweltwirkungsarten	GWF	Kostenarten
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Treibhauspotential (GWP<sub>100</sub>)</li> <li>• Ozonzerstörungspotential (ODP)</li> <li>• Versauerungspotential (AP)</li> <li>• Eutrophierungspotential (EP)</li> <li>• Ökologisches Effektpotential (EPPF)</li> <li>• Energie- und Energieträgereinsatz</li> <li>• Materialeinsatz</li> <li>• Wassereinsatz</li> <li>• Abfallmenge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>28%</li> <li>22%</li> <li>6%</li> <li>6%</li> <li>16%</li> <li>17%</li> <li>0,8%</li> <li>0,2%</li> <li>4%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fertigungsmaterialkosten</li> <li>• Personalkosten</li> <li>• Betriebsmittel- und Sachkosten<sup>1</sup></li> <li>• Kapital- und kalkulatorische Kosten</li> <li>• Kosten empfangener Dienstleistungen</li> <li>• Steuern, Gebühren und sonstige Kosten.</li> </ul>

Tab. 19: Ökologische und ökonomische Kriterien bei der Bewertung des Magnesiumspritzgießens<sup>2</sup>

Bei der Definition der Prozeßgrenzen für die Flußartenrechnung liegt der Fokus auf der Gußteilherstellung. Da es für einen Vergleich der beiden Technologien Magnesiumspritzgießen und Druckgießen jedoch nicht ausreicht, den Gießprozeß für sich alleine zu betrachten, müssen auch mit diesem direkt verknüpften, unternehmensinternen Prozesse in die Betrachtung einbezogen werden, um die Produktion eines den Qualitätsanforderungen genügenden Gutteils vollständig abzubilden. Im betrachteten Fall sind dies die Prozesse Rohmaterialaufbereitung (d.h. Vorwärmen und Aufschmelzen des Masselmaterials beim Druckgießen), Entgraten und Qualitätskontrolle. Zur Berechnung des Flußgrößenvektors für die Bezugsgrößen Bauteilmasse und Kapazitätszeiteinheit werden für diese gekoppelten Prozesse eigene Integrierte Prozeßmodelle aufgestellt und die Einzelprozesse durch entsprechende Skalierungsfaktoren zu einem Gesamtmodell verknüpft.<sup>3</sup>

Vor- und nachgelagerte Prozeßketten außerhalb der Unternehmensgrenzen werden über entsprechende Charakterisierungsfaktoren und Verrechnungspreise einbezogen. Vor dem Hintergrund einer möglichen Verwendung der Ergebnisse für eine Lebenswegbetrachtung von Magnesiumbauteilen sind dabei insbesondere die Prozeßketten der Magnesiumherstellung, Energieerzeugung und Recycling des Kreislaufmaterials zu berücksichtigen, da aus anderen Untersuchungen bekannt ist, daß diese Flüsse von besonderer Relevanz für das Ergebnis sind [Schultz 1999; Grimminger 1999]. Für die Produktionsprozeßkosten ist es dagegen ausreichend, den Fokus auf die Herstellkosten des Gußteils zu begrenzen, da über die Verrechnungspreise der einzelnen Flüsse betriebswirtschaftlich relevante Effekte ausreichend berücksichtigt werden.

<sup>1</sup> Betriebsmittel- und Sachkosten: Z.B. Kosten für Hilfs- und Betriebsstoffe, Energie und Entsorgung.

<sup>2</sup> GWF = Gewichtungsfaktor der Umweltwirkungsarten (s. Kap. 7.2). Bei den Kostenarten kann eine Gewichtung entfallen (s. Kap. 7.3).

<sup>3</sup> Beispielsweise erfordert im Rahmen der Qualitätskontrolle entdeckter Ausschuß das Gießen zusätzlicher Bauteile und führt damit zu einem Anstieg des Rohmaterialverbrauchs.

## 9.3 Prozeßmodellierung und Grundrechnung

### 9.3.1 Prozeßmodellierung Magnesiumspritzgießen (Thixomolding)

Magnesiumspritzgießen ist ein Verfahren zur Verarbeitung teilerstarrender Magnesiumlegierungen im Bereich ihres Schmelzintervalls und läßt sich im wesentlichen auf Patente zum Thixomolding zurückführen, die bei DOW Chemical, USA entwickelt wurden.<sup>1</sup> Als Aufgabegut für den Prozeß dient Magnesiumgranulat, das der Maschine über eine volumetrische Dosierung zugeführt wird (Abb. 48). Im Einzugsbereich verhindert eine Argonatmosphäre das Eindringen von Luftsauerstoff in das System. Anschließend wird das Material im von außen beheizten Maschinenzylinder auf 560-620°C erwärmt, wobei es nicht vollständig aufschmilzt und mit Hilfe einer dem Kunststoffspritzgießen ähnlichen Schnecke zur Maschinendüse gefördert wird.<sup>2</sup> Durch die Rotation der Schnecke erfolgt eine Scherung und Umformung der dendritischen Ausgangsstruktur des Materials zu globulitischen Feststoffpartikeln, die in der Schmelze eingelagert sind [Dworog 2001].

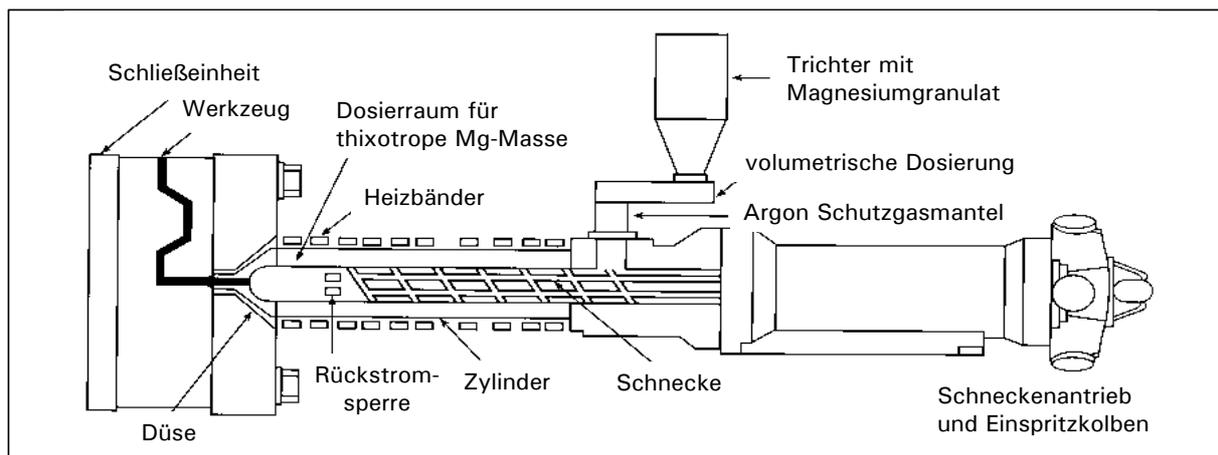


Abb. 48: Verfahrensprinzip Magnesiumspritzgießen (Thixomolding)

Durch ein Zurückziehen der Schnecke sammelt sich die thixotrope Schmelze im Schneckenorraum an, bis das Schußvolumen erreicht ist. Das Einspritzen des Materials in die Werkzeugkavität erfolgt durch einen hydraulisch gesteuerten Vorschub der Schnecke, typischerweise innerhalb von 30-100ms. Durch eine im Vergleich zum Druckgießen langsamere Formfüllung und die höhere Viskosität des Materials ist eine Formfüllung möglich, die weniger Verwirbelungen und Lufteinschlüsse in der Schmelze verursacht, was wiederum zu einer besseren Bauteilqualität führt. Aufgrund des eingestell-

<sup>1</sup> Zur Beschreibung des Verfahrens siehe z.B. [Dworog 1999b; Bradley 1991]. Der erste Prototyp einer Thixomolding-Maschine wurde Ende 1991 in Betrieb genommen. Aufgrund der patentrechtlichen Situation gibt es weltweit nur zwei Hersteller von Thixomolding-Maschinen: Japan Steel Works (JSW), Japan und Husky Injection Systems Ltd., Kanada.

<sup>2</sup> Der Feststoffgehalt wird mit der Wahl des Temperaturprofils eingestellt und beträgt üblicherweise 5 bis 40%.

ten Temperaturprofils entlang des Zylinders erstarrt das Material nach dem Schuß in der Düsenspitze zu einem Pfropfen, der die Maschine verschließt und verhindert, daß beim nächsten Dosiervorgang Magnesiumschmelze aus der Maschine austritt. Der entstandene Pfropfen wird bei jedem Schuß durch den sich beim Vorlaufen der Schnecke aufbauenden Druck gelöst und in der Angießbuchse des Werkzeugs in einem sogenannten Pfropfenfänger aufgefangen. Nach Ablauf einer Kühlzeit, die zugleich zur Dosierung des Materials für den nächsten Gießvorgang genutzt wird, kann das Werkzeug geöffnet und das Bauteil samt Anguß entnommen werden. In einer Serienproduktion erfolgt die Entnahme mit Hilfe eines Roboters, der auch die Form mit Trennmittel einsprüht. Abschließend wird das Bauteil in einer Entgratpresse vom Anguß getrennt und einer Qualitätsprüfung unterzogen.

Die Modellierung der Herstellung von Magnesiumbauteilen mittels Magnesiumspritzgießen umfaßt den einstufigen Gießprozeß und die nachfolgenden Schritte Bauteilentnahme, Entgraten und Qualitätsprüfung. In Abb. 49 ist das entsprechende Integrierte Prozeßmodell mit seinen In- und Outputs dargestellt.

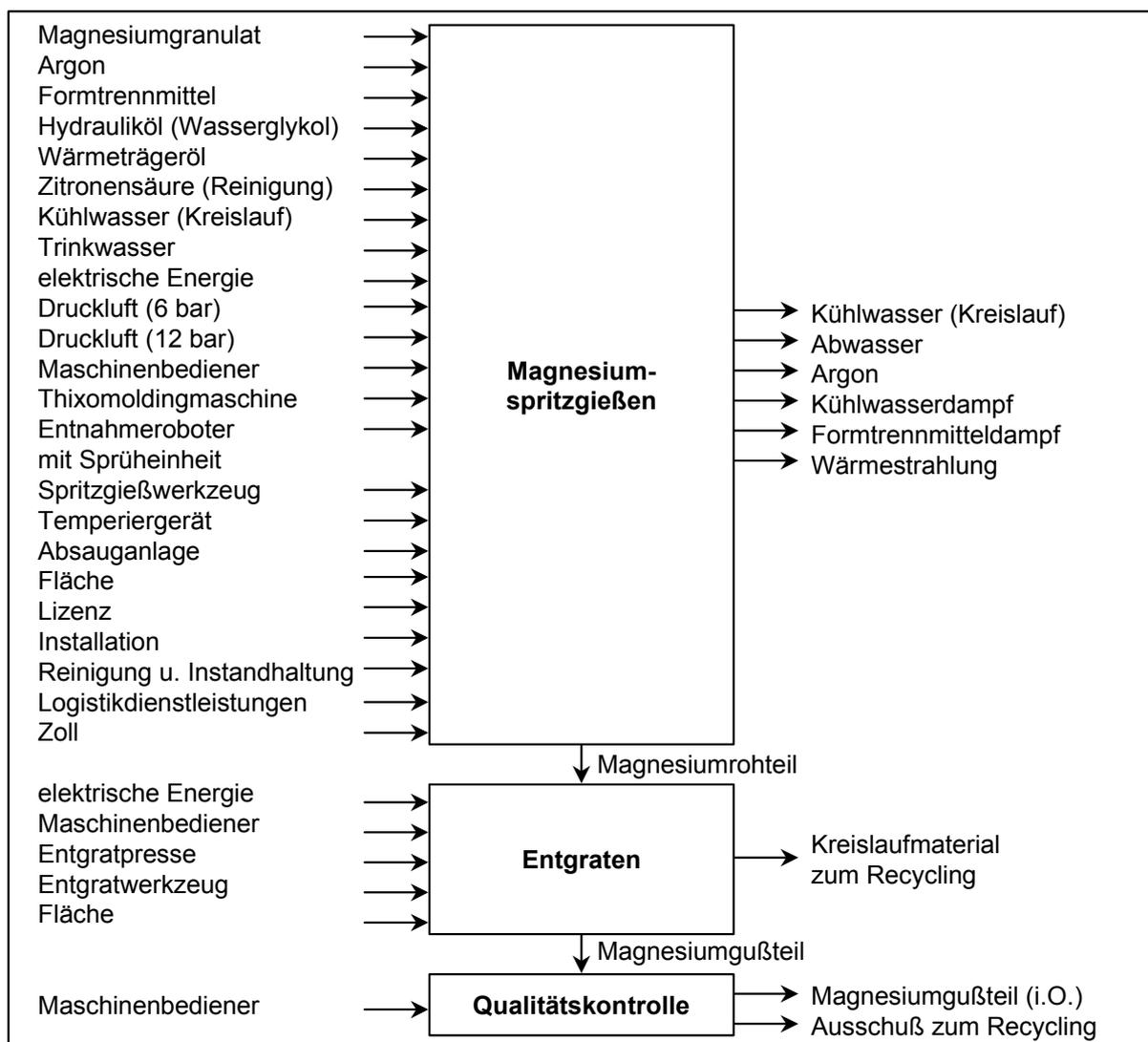


Abb. 49: Integriertes Prozeßmodell für das Magnesiumspritzgießen

### 9.3.2 Prozeßmodellierung Magnesiumdruckgießen

Als Vergleichsbasis für die Bewertung der neuen Technologie des Magnesiumspritzgießens wird das Druckgießen von Magnesiumlegierungen als Stand der Technik herangezogen. Bei diesem Verfahren wird Schmelze in einem separaten Gießofen auf 670-720°C erhitzt und anschließend in der Druckgießmaschine unter hohem Druck und mit hoher Geschwindigkeit in die Form gepreßt. Übliche Formfüllzeiten liegen im Bereich von 20-80 Millisekunden, so daß sich Geschwindigkeiten der Schmelze im Anguß im Bereich von 30-50 m/s und eine turbulente Formfüllung ergeben [Hydro 1999].

Beim Druckgießen werden grundsätzlich die beiden Verfahrensvarianten Warmkammer- und Kaltkammerdruckguß unterschieden. Während sich bei Warmkammermaschinen die Gießgarnitur mit der darin eingebauten Gießkammer ständig in der Metallschmelze des Gießofens befindet, wird bei Kaltkammermaschinen das flüssige Metall bei jedem Schuß mit Hilfe einer Dosiereinrichtung aus dem Schmelzofen in die Gießkammer der Maschine gefüllt (Abb. 50). Warmkammerdruckguß wird primär für kleine und mittelgroße Gußstücke eingesetzt, während Kaltkammermaschinen auch für die Herstellung größerer Gußstücke von mehreren Kilogramm Gewicht geeignet sind [Brunnhuber 1991]. In Anbetracht der Maschinen- und Bauteilgröße, wird das Verfahren Warmkammerdruckgießen als Referenz für die Bewertung der Technologie des Magnesiumspritzgießens herangezogen.

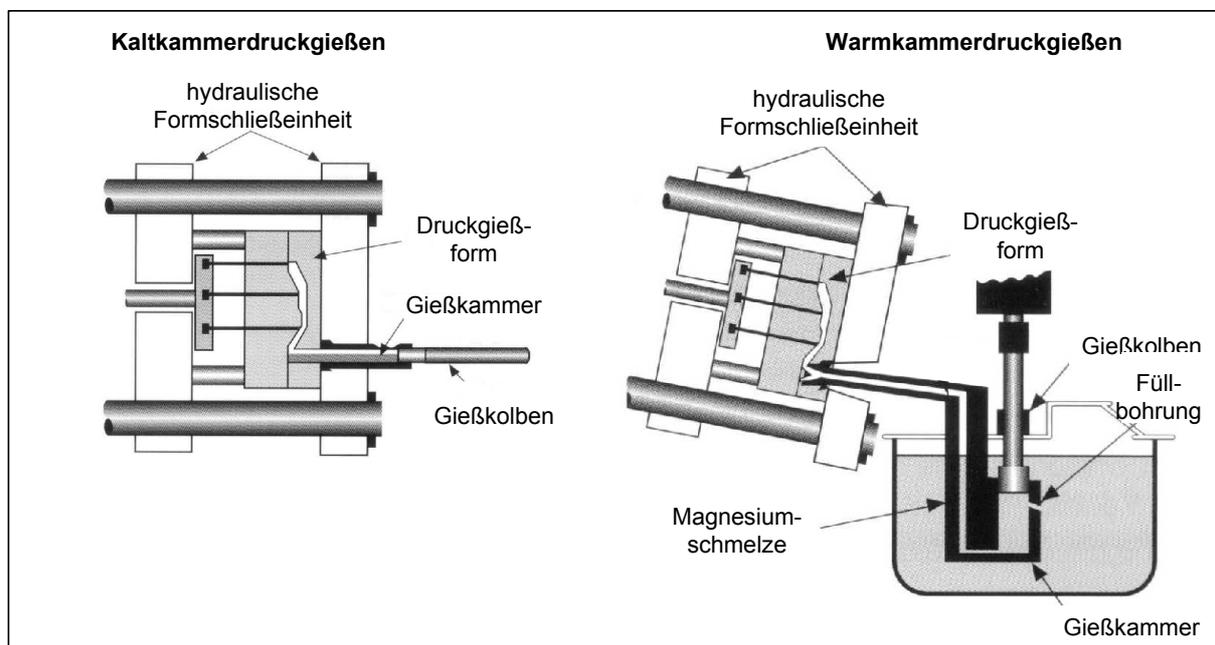


Abb. 50: Verfahrensprinzip Druckgießen [Hydro 1999]

Da eine Magnesiumschmelze an normaler Atmosphäre zur Selbstentflammung neigt, muß das Schmelzbad im Gieß- oder Warmhalteofen mit einer Schutzgasschicht abgedeckt werden, wobei üblicherweise ein Gasgemisch aus Stickstoff ( $N_2$ ), Argon (Ar) und Schwefelhexafluorid ( $SF_6$ ) eingesetzt wird, das mit der Schmelzbadoberfläche zu einer luftundurchlässigen Schicht reagiert [Brunnhuber

1991]. Um eine Verunreinigung der Schmelze zu vermeiden, muß die hierbei entstehende Krätze in regelmäßigen Abständen von der Schmelzbadoberfläche abgeschöpft und entsorgt werden. Bedeutender ist jedoch, daß das eingesetzte SF<sub>6</sub> ein extrem hohes Treibhauspotential von 23.900 CO<sub>2</sub>-Äquivalenten besitzt und auf der Liste der nach dem Kyoto-Protokoll zu reduzierenden Gase steht.

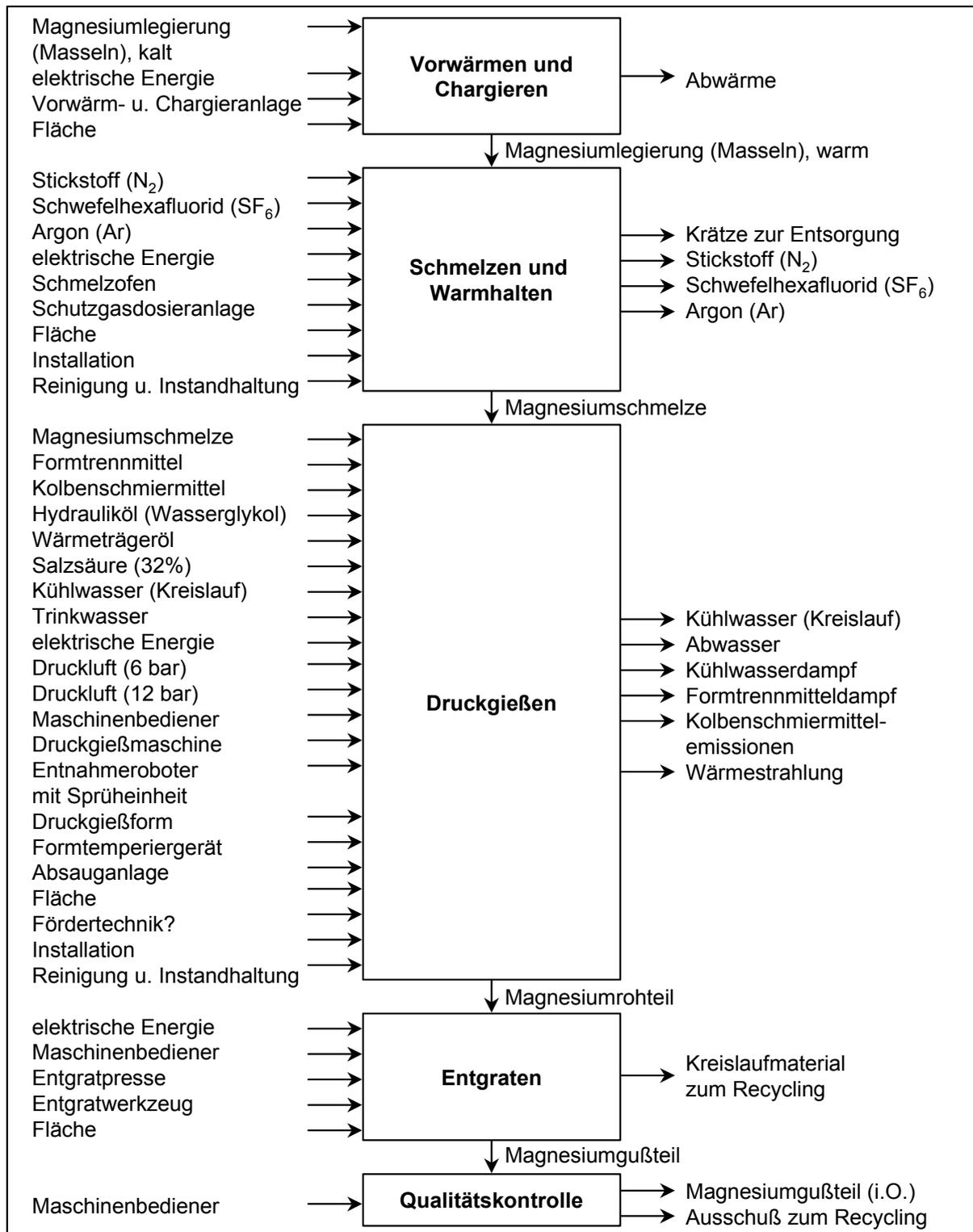


Abb. 51: Integriertes Prozeßmodell für das Magnesiumdruckgießen

Im Gegensatz zum Magnesiumspritzgießen handelt es sich beim Druckguß um einen mehrstufigen Gießprozeß mit den Schritten Masselvorwärmung, Aufschmelzen der Legierung und Temperierung der Schmelze im Ofen sowie dem eigentlichen Gießen des Bauteils in der Druckgießmaschine (Abb. 51). Die Prozeßschritte Bauteilentnahme, Einsprühen der Form mit Trennmittel, Entgraten und Qualitätskontrolle des Bauteils sind dagegen mit denen des Magnesiumspritzgießens vergleichbar.

### **9.3.3 Ergebnisse der Grundrechnung**

#### **9.3.3.1 Ergebnisse der Flußartenrechnung**

Für die vergleichende Bewertung der Technologien Magnesiumspritzgießen und -druckgießen werden die Flüsse ihrer Reagibilität entsprechend nach ausbringungs- und zeitabhängigen Größen differenziert erfaßt und für die Ermittlung des Prozeßsatzes auf die produktneutralen Bezugsgrößen Bauteilmasse (1kg ) bzw. genutzte Kapazitätseinheit (1h) verrechnet.

Die Einsatzmengen für Energie, Betriebsstoffe und Kreislaufmaterial werden in der Praxis oftmals periodenbezogen und nicht prozeßbezogen im Rahmen der Gemeinkosten erfaßt, obwohl diese Flüsse vom Charakter her überwiegend abhängig von der Ausbringungsmenge sind. Für eine verursachungsgerechte Verrechnung ist dagegen eine systematische Erfassung an den Verbrauchsorten wünschenswert, zumal hierdurch auch eine zutreffendere Schlüsselung der im Rahmen der betrieblichen Kostenrechnung erfaßten Gemeinkosten möglich wird. Die Ermittlung der zeitabhängigen Flußgrößen gestaltet sich dagegen einfacher.

Bei den ausbringungsabhängigen Größen werden in dem hier vorgestellten Anwendungsbeispiel produktartabhängige Flüsse separat ausgewiesen (Gieß- und Entgratwerkzeuge), da diese Flußgrößen nicht allein durch die Ausbringungsmenge und die in Anspruch genommene Kapazität bestimmt werden, sondern primär durch Eigenschaften des mit der Technologie hergestellten Produkts selbst.<sup>1</sup> Im Fall der untersuchten Technologien kann hierdurch indirekt die Bauteilkomplexität, als zusätzlicher Parameter berücksichtigt werden. Denn aus der Erfahrung ist bekannt, daß die Werkzeugkosten, die vor allem von der Komplexität des Bauteils abhängen, neben den Materialkosten den größten Einfluß auf die ausbringungsabhängigen Kosten haben. Zum anderen sind die Kosten für ein Gießwerkzeug nicht unbedingt proportional zur Bauteilmasse bzw. -größe, sondern werden im wesentlichen von anderen Parametern bestimmt, wie der projizierten Fläche des Bauteils, der Tiefe und Komplexität der Kavität sowie der Anzahl der Schieber und Trennflächen. Neben den Kosten für den Formenbau sind die anteiligen Werkzeugkosten auch von der Standzeit des Werkzeugs abhängig, und diese wiederum

von der gewählten Gießtechnologie.<sup>2</sup> Soll das Ergebnis der Bewertung für eine überschlägige Kalkulation eines bestimmten Bauteils genutzt werden, so kann der Wert für die Werkzeugkosten relativ einfach durch einen Formenbauer abgeschätzt und in der Rechnung berücksichtigt werden.

Für die übrigen ausbringungs- und zeitabhängigen (d.h. nicht direkt produktartabhängigen) Flüsse folgende produkt- und technologieabhängige Parameter identifizieren, die einen bedeutenden Einfluß auf die quantitative Ausprägung der Flüsse haben (Tab. 20):

- Verhältnis Bauteilgewicht zu Schußgewicht<sup>3</sup>: Magnesiumspritzgießen gestattet mehr Freiheiten bei der Angußgestaltung und ermöglicht in vielen Fällen ein direkteres Angießen des Bauteils, so daß der Anteil des Kreislaufmaterials geringer ausfallen kann, so daß sich ein insgesamt geringerer Rohmaterialbedarf ergibt.
- Zykluszeit: Im ersten Ansatz werden für beide Technologien gleiche Zykluszeiten angenommen, da bei einer entsprechenden Maschinenauslegung Nebenzeiten für Öffnen des Werkzeugs, Bauteilentnahme und Sprühen der Form maßgeblich die Zykluszeit bestimmen und weitgehend unabhängig von der eingesetzten Gießtechnologie sind.
- Ausschußquote: Beim Magnesiumspritzgießen wird eine geringere Quote als beim Druckgießen angesetzt, da die thixotrope Schmelze ein besseres Formfüllverhalten mit entsprechend weniger Gießfehlern und einer daraus resultierenden höheren Bauteilqualität ermöglicht.
- Theoretische Gesamtkapazität der Anlage in Stunden: Sie ist ein entscheidender Faktor für die Umlage der mit der Investition verbundenen Kosten auf eine Kapazitätseinheit und errechnet sich aus der Nutzungsdauer der Anlage in Jahren multipliziert mit der Anzahl der Schichten und Arbeitsstunden pro Mitarbeiter und Jahr.
- Verfügbarkeit der Anlage: Die tatsächlich nutzbare Kapazität der Anlage ist aufgrund von Prozeßstörungen, Wartung und Instandhaltung deutlich geringer als die theoretische. Beim Magnesiumspritzgießen wird eine höhere Anlagenverfügbarkeit angenommen, da auf einen separaten Gießofen und Schmelzehandling verzichtet werden kann (Dementsprechend entfallen die Ausfallzeiten bedingt durch Abkrätzen der Schmelze, Ofenreinigung und Probleme mit Schmelzedosierpumpen).
- Personalbedarf: Für beide Technologien wird der gleiche Personalbedarf für Anlagenbedienung, Materialhandling und Qualitätsprüfung angesetzt. (Annahme: 1 Mitarbeiter bedient 2 Maschinen.)

---

<sup>1</sup> Die produktartabhängigen Flüsse gehören zwar zu den ausbringungsabhängigen Größen, sind jedoch im Falle der bewerteten Gießtechnologien in erster Linie von der Komplexität der Bauteilgeometrie (bauteilabhängig) und der Werkzeugstandzeit (technologieabhängig) abhängig.

<sup>2</sup> Da beim Magnesiumspritzgießen die Temperatur der Schmelze um ca. 100°C niedriger ist als beim Druckgießen, ist die thermische Wechselbelastung des Formwerkstoffs geringer, so daß sich Heißrisse in der Form erst nach einer höheren Schußzahl ausbilden. Ebenfalls standzeiterhöhend wirkt sich die geringere Formfüllgeschwindigkeit aus, da hierdurch weniger Erosionserscheinungen in der Kavität auftreten.

<sup>3</sup> Das Schußgewicht ist die Summe aus dem Materialeinsatz für Bauteil, Anguß, Fließhilfen und Überläufe.

	Magnesiumspritzgießen	Druckgießen
Bauteilgewicht	1,000 kg	1,000 kg
Schußgewicht	1,300 kg	1,400 kg
Zykluszeit	50 s	50 s
Ausschußquote	4 %	5 %
Stunden pro Schicht	8 h/Schicht	8 h/Schicht
Anzahl Schichten	2 Schichten/Arbeitstag	2 Schichten/Arbeitstag
Arbeitstage pro Jahr	240 Arbeitstage/Jahr	240 Arbeitstage/Jahr
Nutzungsdauer	7,5 Jahre	7,5 Jahre
Anlagenverfügbarkeit	75 %	75 %
Theoretische Gesamtkapazität der Anlage	21.600 h	21.600 h
Personalbedarf (Mehrmaschinenbedienung)	0,5 Bediener	0,5 Bediener

Tab. 20: Wichtige der Grundrechnung zugrunde gelegte maschinen- und prozeßbezogene Parameter

In Tab. 21 sind die mit der Herstellung eines repräsentativen Bauteils von 1 kg Gewicht im Magnesiumspritzgießen bzw. Druckgießen verbundenen Flüsse in aggregierter Form dargestellt, wobei die Werte des Druckgießens als Referenz (100%) herangezogen werden.

Insbesondere für zeitabhängige Flüsse ergeben sich zum Teil sehr kleine Absolutwerte, da die Verrechnung auf die Bezugsgröße 1 Stunde über die verfügbare Gesamtkapazität (bezogen auf die gesamte Nutzungszeit der Anlagen) und die Zykluszeit erfolgt. Da es sich lediglich um ein Zwischenergebnis handelt, sind der besseren Übersichtlichkeit wegen nur die Werte der wichtigsten Flußarten dargestellt und diese, dem Aufbau des Integrierten Kontenplans (s. Kap. 6.2.1) entsprechend, zu Gruppen zusammengefaßt. Aus demselben Grund wird in der Darstellung auf eine Differenzierung nach ausbringungs- zeit- und produktartabhängigen Flüssen verzichtet.

Aus dem Aufbau des Flußgrößenvektors wird zudem deutlich, daß die Flußartenrechnung einer um betriebswirtschaftlich relevante Flüsse erweiterten Sachbilanz eines Prozesses vergleichbar ist.

	Magnesiumspritzgießen			Druckgießen		
<b>Input</b>						
Rohmaterial	1,354	kg	90%	1,504	kg	100%
Hilfs- und Betriebsstoffe	0,025	kg	59%	0,043	kg	100%
Energie	1,673	kWh	58%	2,897	kWh	100%
Wasser	0,003	m³	73%	0,003	m³	100%
Personalkapazität	0,009	h	92%	0,010	h	100%
anteilige Anlagenkapazität	7,68E-07	-	81%	9,48E-07	-	100%
anteilige Fläche	0,0004	m²	59%	0,0007	m²	100%
<b>Output</b>						
Produkt	1,000	kg	100%	1,000	kg	100%
Material zum Recycling	0,354	kg	75%	0,474	kg	100%
Abwasser	9,6E-06	m³	0%	0,002	m³	100%
Emissionen in Luft	2,528	kg	92%	2,746	kg	100%
Abfälle	0	kg	0%	0,030	kg	100%

Tab. 21: Aggregiertes Ergebnis der Flußartenrechnung für ein repräsentatives Produkt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bezug: Repräsentatives Bauteil von 1 kg Masse. Zeitabhängige Größen wurden über eine Zykluszeit von 50 Sekunden verrechnet Ähnliche Flußarten sind zusammengefaßt.

### 9.3.3.2 Ergebnisse der Umweltwirkungsarten- und Kostenartenrechnung

Mit der Umweltwirkungsarten- bzw. Kostenartenrechnung erfolgt die ökologische respektive ökonomische Bewertung der In- und Outputs der untersuchten Prozesse. Die Multiplikation des detaillierten Flußgrößenvektors mit Äquivalenzfaktoren und Verrechnungspreisen ergibt die Bewertungsgrößenmatrix. Eine Aggregation der Umweltwirkungsindikatorergebnisse und Kosten über alle Flußarten für ein repräsentatives Bauteil von 1 kg und eine angenommene Zykluszeit von 50 Sekunden, führt zu dem in Tab. 22 dargestellten Bewertungsgrößenvektor als Ergebnis der Grundrechnung.

Magnesiumspritzgießen			Druckgießen			
<b>Umweltwirkungen ohne vor- und nachgelagerte Prozesse</b>						
Treibhauspotential (GWP100)	0,000	kg CO <sub>2</sub>	0%	0,676	kg CO <sub>2</sub>	100%
Ozonerstörungspotential (ODP)	0,000	kg CF <sub>11</sub>	-*	0,000	kg CF <sub>11</sub>	-*
Versauerungspotential (AP)	0,000	kg SO <sub>2</sub>	-*	0,000	kg SO <sub>2</sub>	-*
Eutrophierungspotential (EP)	0,000	kg PO <sub>4</sub> <sup>3+</sup>	-*	0,000	kg PO <sub>4</sub> <sup>3+</sup>	-*
Ökolog. Effektpotential (EPPF)	0,000	kg	-*	0,000	kg	-*
Abfallmenge	0,000	kg	0%	0,031	kg	100%
Energie- und Energieträgereinsatz	2,789	kWh	68%	4,112	kWh	100%
Materialeinsatz	1,132	kg	100%	1,136	kg	100%
Wassereinsatz	0,003	m <sup>3</sup>	59%	0,004	m <sup>3</sup>	100%
<b>Umweltwirkungen inkl. vor- und nachgelagerter Prozesse</b>						
Treibhauspotential (GWP100)	36,270	kg CO <sub>2</sub>	82%	44,076	kg CO <sub>2</sub>	100%
Ozonerstörungspotential (ODP)	0,000	kg CF <sub>11</sub>	95%	0,00	kg CF <sub>11</sub>	100%
Versauerungspotential (AP)	4,1E-02	kg SO <sub>2</sub>	95%	4,3E-02	kg SO <sub>2</sub>	100%
Eutrophierungspotential (EP)	0,005	kg PO <sub>4</sub> <sup>3+</sup>	95%	0,005	kg PO <sub>4</sub> <sup>3+</sup>	100%
Ökolog. Effektpotential (EPPF)	0,005	kg	95%	0,005	kg	100%
Abfallmenge	65,090	kg	95%	68,383	kg	100%
Energie- und Energieträgereinsatz	62,051	kWh	95%	65,591	kWh	100%
Materialeinsatz	63,496	kg	95%	66,663	kg	100%
Wassereinsatz	0,674	m <sup>3</sup>	95%	0,709	m <sup>3</sup>	100%
<b>Kosten</b>						
Fertigungsmaterialkosten	4,38	€	140%	3,13	€	100%
Personalkosten	0,72	€	92%	0,79	€	100%
Betriebsmittel und Sachkosten	2,45	€	88%	2,79	€	100%
Kapital und kalk. Kosten	0,28	€	45%	0,63	€	100%
Kosten für empf. Dienstleistungen	0,00	€	-*	0,00	€	-*
Steuern, Gebühren etc.	0,11	€	100%	0,00	€	0%
-* keine Beitrag zu der betreffenden Umweltwirkungs- bzw. Kostenart						

Tab. 22: Bewertungsgrößenvektor (BGV)<sup>1</sup>

Für die ökologische Bewertung sind neben den Ergebnissen einer rein prozeßbezogenen Betrachtung auch die Umweltwirkungen bei einer Einbeziehung vor- und nachgelagerter Prozesse angegeben.

Durch entsprechende Äquivalenzfaktoren wurden hierzu die Prozesse "Rohmaterialherstellung" (Herstellung der Magnesiumlegierungen in Form von Masseln bzw. Granulat für das Spritzgießen), "Mag-

<sup>1</sup> Bezug: Repräsentatives Bauteil von 1 kg Masse. Zeitabhängige Größen wurden über eine Zykluszeit von 50 Sekunden verrechnet.

nesiumrecycling“ und ”Stromerzeugung“ in die Rechnung einbezogen. Auch wenn die Werte der Grundrechnung noch nicht zur Kennzahl des Umweltwirkungsindex aggregiert sind, zeigt sich bereits hier die große Bedeutung, die der Wahl des Untersuchungsrahmens für das Bewertungsergebnis zukommt.

## 9.4 Auswertungsrechnung und Ableiten einer Bewertungsaussage

### 9.4.1 Ergebnisse der Auswertungsrechnung

Mit der Auswertungsrechnung werden die zuvor dargestellten Ergebnisse zu den Entscheidungsgrößen Umweltwirkungsindex UWI und Produktionsprozeßkosten PPK verdichtet. Der ökologische Part beinhaltet die Schritte Normalisierung, Gewichtung und Aggregation, während zur Berechnung der ökonomischen Entscheidungsgröße lediglich eine Aufsummierung über die einzelnen Kostenarten erforderlich ist. Entsprechend dem Ziel der Bewertung, einen Prozeßsatz für die Technologie des Magnesiumspritzgießens zu ermitteln, besteht das Ergebnis aus mehreren Komponenten (Tab. 23). Die Ausbringungskomponente beschreibt den Beitrag zur Gesamtumweltwirkung bzw. die Kosten des Produktionsprozesses pro parametrisierte Ausbringungseinheit, in diesem Fall pro kg Bauteilgewicht und pro Produkteinheit (zur Berücksichtigung der anteiligen Werkzeugkosten als produktartabhängige Kosten). Die Kapazitätszeitkomponente bezieht sich dagegen nur auf den Parameter der in Anspruch genommenen Anlagenkapazität in Stunden.

	Magnesiumspritzgießen		Druckgießen	
<b>Umweltwirkungsindex (UWI) ohne vor- und nachgelagerte Prozesse</b>				
ausbringungsabhängig	13,16 *10 <sup>-14</sup> /kg	68%	19,24 *10 <sup>-14</sup> /kg	100%
produktartabhängig	0,00 *10 <sup>-14</sup> /Stk	-	0,00 *10 <sup>-14</sup> /Stk	-
zeitabhängig	0,28 *10 <sup>-14</sup> /h	0%	1224,00 *10 <sup>-14</sup> /h	100%
<b>Umweltwirkungsindex (UWI) inkl. vor- und nachgelagerte Prozesse</b>				
ausbringungsabhängig	326926 *10 <sup>-14</sup> /kg	93%	353298 *10 <sup>-14</sup> /kg	100%
produktartabhängig	0,00 *10 <sup>-14</sup> /Stk	-	0,00 *10 <sup>-14</sup> /Stk	-
zeitabhängig	1,31 *10 <sup>-14</sup> /h	0%	1228,29 *10 <sup>-14</sup> /h	100%
<b>Produktionsprozeßkosten (PPK)</b>				
ausbringungsabhängig	4,52 €/kg	135%	3,36 €/kg	100%
produktartabhängig	0,94 €/Stk	54%	1,74 €/Stk	100%
zeitabhängig	178,71 €/h	112%	160,14 €/h	100%

Tab. 23: Prozeßsätze der Technologien Magnesiumspritzgießen und Druckgießen im Vergleich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bezug: Repräsentatives Bauteil von 1 kg Masse. Zeitabhängige Größen wurden über eine Zykluszeit von 50 Sekunden verrechnet.

Die Ergebnisse zeigen, daß die verursachten Umweltwirkungen beim Magnesiumspritzgießen weitgehend ausbringungsabhängig sind, während die Produktionsprozeßkosten in erster Linie zeitabhängig sind. Eine detailliertere Analyse der Datenbasis ergibt, daß die Umweltwirkungen maßgeblich durch die Flüsse Energieeinsatz (bei einer Fokussierung auf den Gießprozeß) bzw. Ausgangsmaterial (bei einer Berücksichtigung vor- und nachgelagerter Prozesse) bestimmen werden. Dies belegt den großen Einfluß, den der gewählte Untersuchungsrahmen auf das Bewertungsergebnis haben kann. Bei beiden Technologien haben die Umweltwirkungen der vor- und nachgelagerten Prozeßketten "Energieerzeugung", "Rohmaterialherstellung" und "Magnesiumrecycling" einen großen Einfluß auf das Gesamtergebnis. Geringe Variationen von Produkt- oder Prozeßparametern, die den Energieverbrauch oder die Effizienz des Rohmaterialeinsatzes betreffen, können daher das Bewertungsergebnis entscheidend beeinflussen. Bei den Produktionsprozeßkosten ist die eingesetzte Materialmenge ebenfalls der dominierende Faktor für den ausbringungsabhängigen Anteil. Der Stundensatz wird dagegen durch die anteiligen Personal- und Anlagenkosten dominiert.

Hinsichtlich der Ergebnisrelevanz einzelner Flüsse gelten die vorangegangenen Aussagen auch für die Technologie des Druckgießens. Allerdings beeinflussen dort verfahrensbedingte Emissionen des Schutzgases SF<sub>6</sub> signifikant das Ergebnis und sind der ausschlaggebende Grund für die Überlegenheit der Technologie des Magnesiumspritzgießens in ökologischer Hinsicht.

Der als Ergebnis der Auswertungsrechnung ermittelte Prozeßsatz kann zur Berechnung des mit der Herstellung eines konkreten Produkts verbundenen Beitrags zur Umweltwirkung und der verursachten Produktionsprozeßkosten genutzt werden, indem konkrete Produkt- und Prozeßparameter vorgegeben werden. Mit einer derartigen Beispielkalkulation wird zugleich die Komplexität der Bewertungsaussage reduziert bzw. die Ergebnisinterpretation deutlich vereinfacht, da die ausbringungs-, produktart- und zeitabhängigen Komponenten des Prozeßsatzes zu den beiden Entscheidungsgrößen Umweltwirkungsindex und Produktionsprozeßkosten, bezogen auf die Herstellung einer Produkteinheit, aggregiert werden. In Abb. 52 sind die Ergebnisse für ein repräsentatives Bauteil von 1 kg Masse und einer für die Herstellung angenommenen Zykluszeit von jeweils 50 Sekunden gegenübergestellt, wobei das im Druckgießen hergestellte Bauteil als Bezugsgröße (100%) dient.

Unter den angegebenen Prämissen ergibt sich für das repräsentative Bauteil eine klare Überlegenheit der Technologie des Magnesiumspritzgießens hinsichtlich ökologischer Kriterien, wobei auch hier der Einfluß des Untersuchungsrahmens deutlich wird. Die Umweltvorteile des Verfahrens führen auch zu einer Verbesserung des Gesamtprozesses, wobei jedoch technologiebedingte Mehrkosten in Kauf zu nehmen sind. Vor dem Hintergrund der international beschlossenen Reduktion der Treibhausgase und dem sich hieraus abzeichnenden Risiko eines SF<sub>6</sub>-Verbots, empfiehlt sich der Einsatz der neuen Technologie des Magnesiumspritzgießens. Dies gilt um so mehr, als im Falle eines Verbots von SF<sub>6</sub> bestehende Druckgießanlagen teuer auf alternative Schutzgase umgerüstet werden müßten, was darüber hinaus auch technologische Nachteile (insbesondere Verunreinigungen des Schmelzbads, erhöhter Krätzanfall und erhöhte Korrosionsanfälligkeit der hergestellten Bauteile) mit sich bringen würden.

Derzeit ist Druckgießen jedoch aufgrund der geringeren Bauteilkosten die wirtschaftlichere Technologie. Die Gründe für das schlechtere Abschneiden des Magnesiumspritzgießens liegen unter anderem im hohen Stundensatz und im derzeit noch hohen Preis für Magnesiumgranulat. Im nachfolgenden Kapitel werden daher die Randbedingungen und Einflußfaktoren auf das Ergebnis näher analysiert und die Entwicklungspotentiale für die Technologie des Magnesiumspritzgießens bewertet.

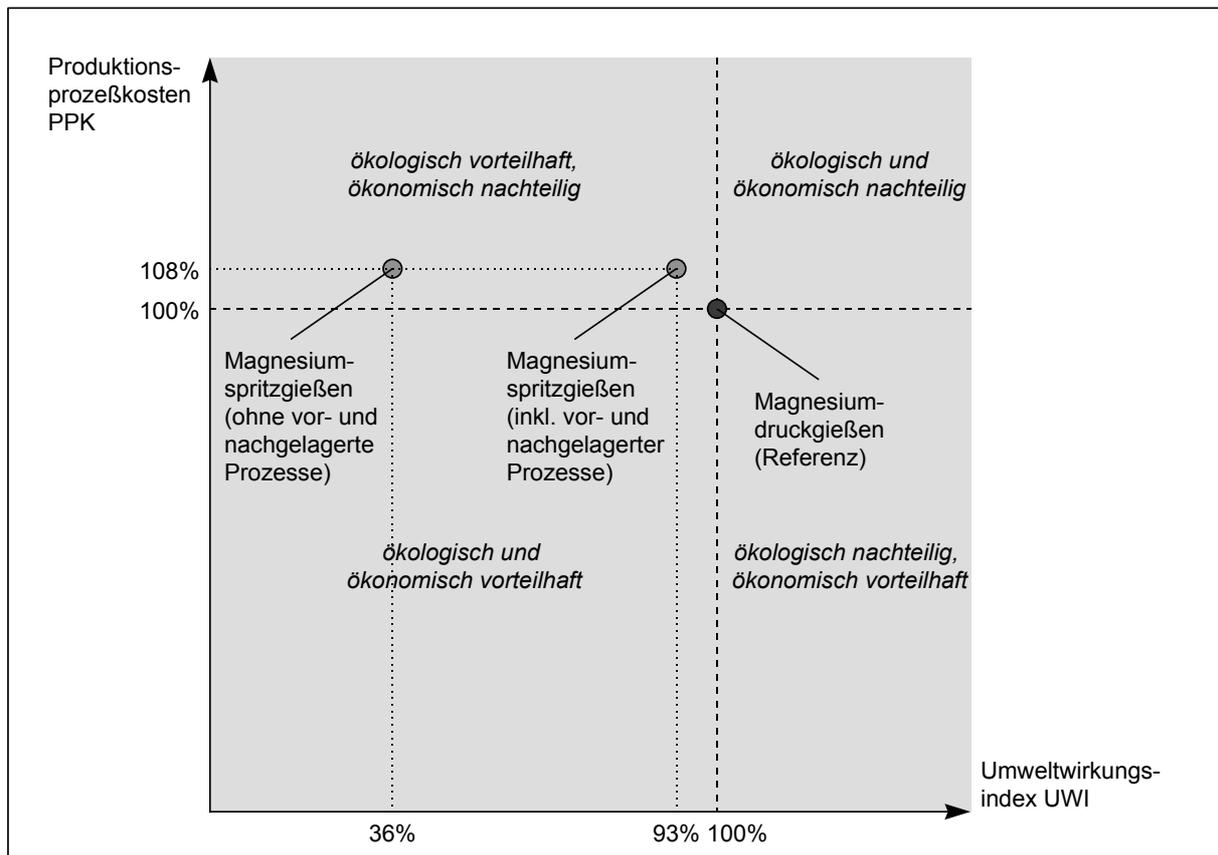


Abb. 52: Vergleich der Ergebnisgrößen UWI und PPK für ein repräsentatives Bauteil<sup>1</sup>

## 9.4.2 Ableiten einer Bewertungsaussage

### 9.4.2.1 Bewertungsaussage auf Basis der ermittelten Ergebnisgrößen

In den wenigsten Fällen einer Technologiebewertung werden die Ergebnisse des Prozeßsatzes so eindeutig ausfallen, daß sofort eine absolute und allgemeingültige Aussagen über die Vorteilhaftigkeit einer Alternative möglich ist. Dies gilt insbesondere für neue Technologien, die sich noch dynamisch entwickeln, und für den Fall, daß mehrere unterschiedliche Parameter das Ergebnis beeinflussen.

<sup>1</sup> Beispielkalkulation für ein repräsentatives Bauteil von 1 kg Masse; Zykluszeit jeweils 50 Sekunden. (Werte für das Druckgußbauteil = 100%)

Der mit Hilfe der Integrierten Bewertung ermittelte Prozeßsatz bietet hierbei eine gute Kalkulationsbasis zur Ermittlung der ökologischen und ökonomischen Vor- und Nachteile. Darüber hinaus kann er zur Bewertung der Entwicklungspotentiale einer Technologie eingesetzt werden. Denn neben der Bestimmung der jeweils optimalen Alternative für unterschiedliche Bauteile kann er auch zur Identifizierung derjenigen prozeß- bzw. produktionsaufgabenbezogene Randbedingungen eingesetzt werden, für die sich das Bewertungsergebnis zugunsten einer anderen Alternative ändert. Ermöglicht wird dies durch die flußorientierte Abbildung mit Hilfe des Integrierten Prozeßmodells und die Konzeption der Grundrechnung (Berücksichtigung der Reagibilität der Flüsse), die Parametervariationen gestattet, um die den Umweltwirkungsindex und die Produktionsprozeßkosten maßgeblich beeinflussenden Stellgrößen zu ermitteln.

In Abb. 53 und Abb. 54 ist dargestellt, wie die von einem repräsentativen Bauteil verursachten Umweltwirkungen und Kosten von den Parametern Bauteilmasse und benötigter Zykluszeit abhängen. Die Werte des Druckgießens dienen hierbei wieder als Referenz (100%) und werden konstant gehalten.

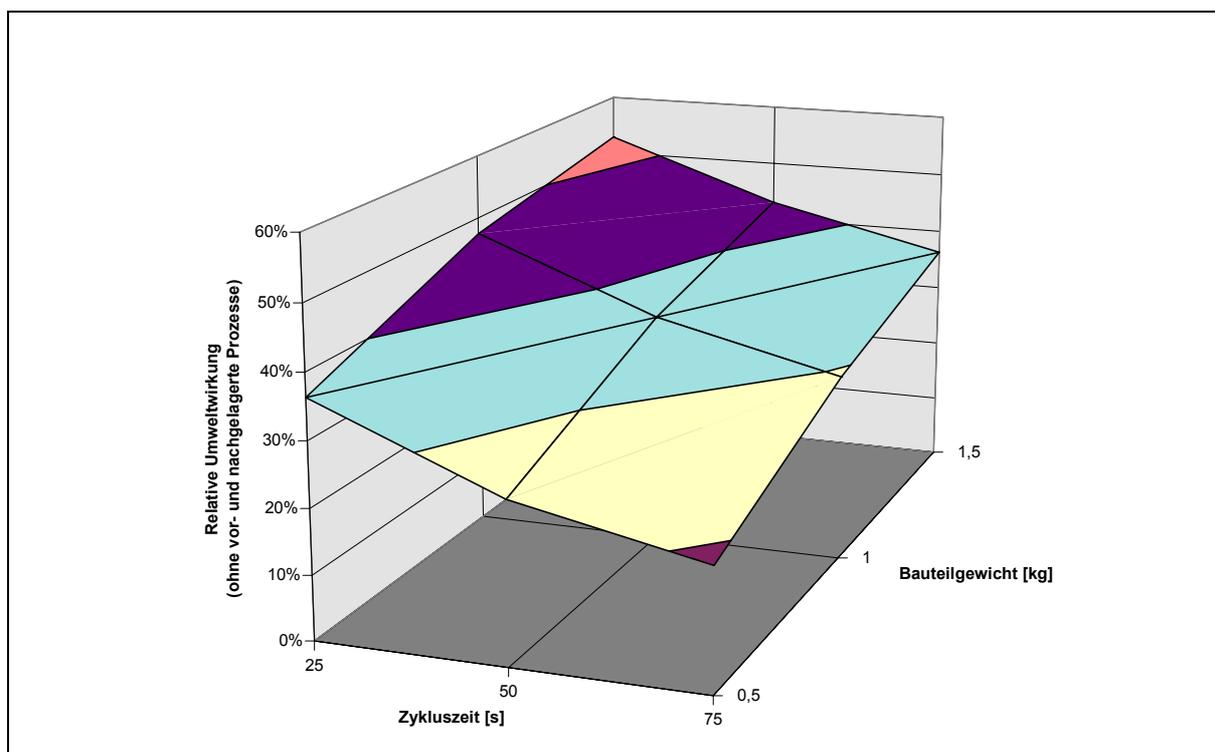


Abb. 53: Relative Umweltwirkungen bei der Herstellung von Magnesiumspritzgießbauteilen in Abhängigkeit von den Parametern Bauteilmasse und Zykluszeit (Druckgießen = 100%)

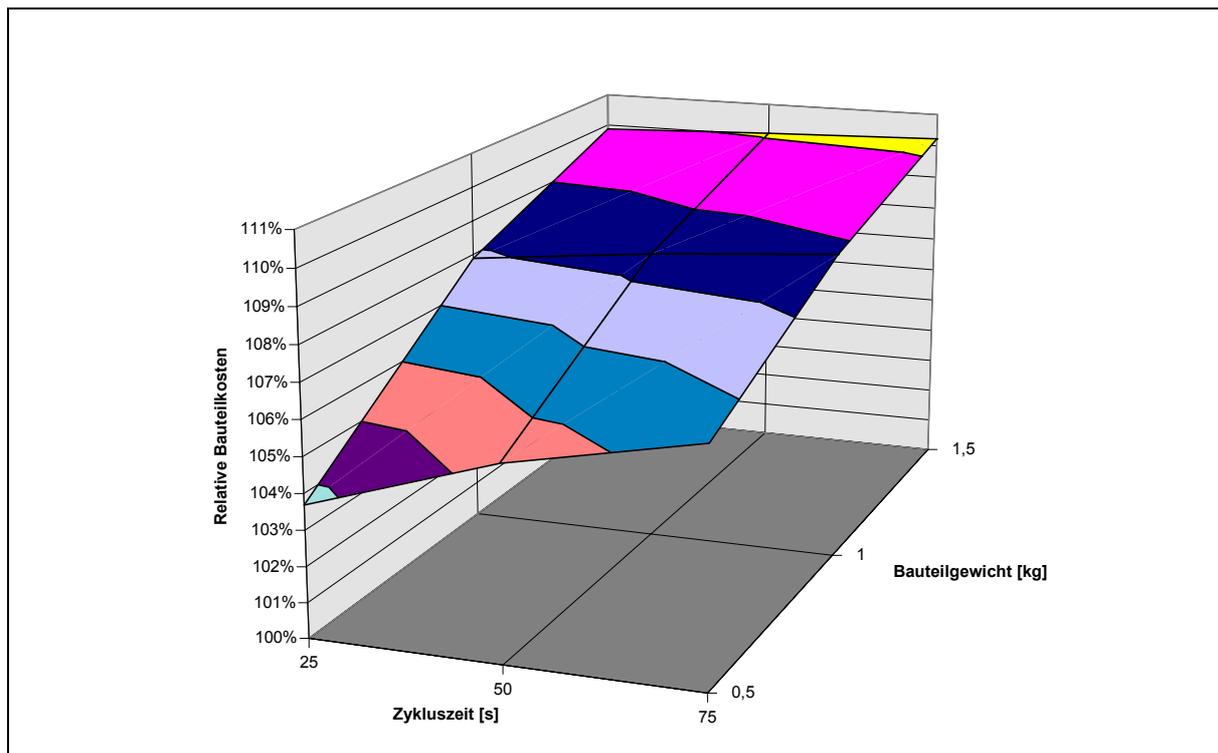


Abb. 54: Relative Bauteilkosten von Magnesiumspritzgießbauteilen in Abhängigkeit von den Parametern Bauteilmasse und Zykluszeit (Druckgießen = 100%)

Die Ergebnisse belegen noch einmal deutlich die Vorteilhaftigkeit der Technologie des Magnesiumspritzgießens aus ökologischer Sicht, jedoch auch den derzeit bestehenden Kostennachteil der Technologie gegenüber der des Druckgießens. Die ökologischen Vorteile des Magnesiumspritzgießens kommen dabei um so stärker zum Tragen, je länger die Zykluszeiten sind, da dann beim Druckgießen die zeitabhängigen SF<sub>6</sub>-Emissionen um so stärker ins Gewicht fallen. Auf der anderen Seite nimmt der Kostennachteil des Magnesiumspritzgießens bei zunehmenden Zykluszeiten und Bauteilgewichten im Vergleich zum Druckgießen deutlich zu.

Mit der Darstellung der Ergebnisse in Form der beiden vorangegangenen Abbildungen ist die Aufgabe der Methode der Integrierten Bewertung erfüllt, durch eine transparente Aufbereitung der Datenbasis eine Entscheidungsgrundlage zu schaffen. Wie bereits in Kap. 2.1 dargelegt, ist es nicht Ziel einer Bewertung, eine Entscheidung zu ersetzen oder zu automatisieren. Statt dessen werden Entscheidungsträger in die Lage versetzt, mit Hilfe der Ergebnisse bewußte und nachvollziehbare Entschlüsse zu treffen. Im vorliegenden Beispiel erfordert dies beispielsweise, eine Entscheidung zwischen ökologischer und ökonomischer Vorteilhaftigkeit zu treffen, bzw. Akzeptanzschwellen in Form von akzeptablen Mehrkosten zu definieren, bis zu denen einer aus ökologischer Sicht vorteilhaften Lösung der Vorzug gegeben wird.

Im Fall des Spritzgießens von Magnesiumlegierungen ist der Kostennachteil gegenüber dem Druckgießen relativ gering, so daß sich eine detailliertere Analyse der vorliegenden Ergebnisse empfiehlt. Dies gilt umso mehr, als es sich beim Magnesiumspritzgießen noch um ein relativ neues und wenig

verbreitetes Verfahren handelt, so daß zum einen gewisse Unsicherheiten bezüglich der Flußgrößen bestehen und zum anderen noch erhebliche Potentiale zur Kostenreduktion vorhanden sind. Im folgenden Kapitel erfolgt daher eine Analyse der Kostentreiber.

#### **9.4.2.2 Bewertung der Entwicklungspotentiale des Magnesiumspritzgießens**

In einer Analyse der mit Hilfe der Integrierten Bewertung ermittelten Datenbasis werden im Folgenden diejenigen Randbedingungen ermittelt, unter denen Magnesiumspritzgießen auch aus ökonomischer Sicht die dem Druckgießen zumindest gleichwertige, zum Teil sogar überlegene Verfahren werden kann. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich dann Ansatzpunkte für eine zielgerichtete Weiterentwicklung der Technologie ableiten. Für die nachfolgenden Untersuchungen werden die Druckgußwerte als fix betrachtet und als konstante Referenzgrößen herangezogen, da es sich bei diesem Verfahren um den Stand der Technik handelt, der nur noch relativ geringes Optimierungspotential besitzt. Es werden somit ausschließlich Parameter für das Magnesiumspritzgießen geändert und die Auswirkungen auf die Herstellkosten eines repräsentativen Bauteils von 1 kg Masse in Relation zum Druckgußergebnis dargestellt.

Für das Magnesiumspritzgießen wird zunächst der Einfluß der Rohmaterialkosten und des Schußgewichts untersucht, da diese Parameter von maßgeblicher Bedeutung für die ausbringungsabhängigen Flüsse sind. Die Ergebnisse zeigen, daß Magnesiumspritzgießen bei einem Granulatpreis von unter 3,10 €/kg<sup>1</sup> oder ab einer Reduzierung des Schußgewichts um 15% gegenüber dem Druckgießen die kostengünstigere Technologie darstellt (Abb. 55).

Derzeit ist der Weltmarkt für Magnesiumgranulat noch vergleichsweise klein und es ist davon auszugehen, daß sich die Rohmaterialkosten durch Scale-Effekte und zunehmenden Wettbewerb durchaus in diesen Bereich bewegen lassen. Hinzu kommt, daß das Granulat gegenwärtig noch durch die Zerspanung von Masselmateriale hergestellt wird, wobei v.a. Ober- bzw. Unterkorn<sup>2</sup> und Werkzeugverschleiß zu Mehrkosten gegenüber dem Rohmaterial für das Druckgießen führen. Es wird jedoch bereits an einer Lösung gearbeitet, um Granulat direkt aus der Schmelze bei der Produktion von Magnesiumlegierungen herzustellen, anstelle zuerst Masseln zu gießen und diese anschließend zu zerspanen. Wenn die Umsetzung dieses Konzepts gelingt, dann besteht zudem noch die Chance, auf den Einsatz von SF<sub>6</sub> als Schutzgas bei der Rohmaterialherstellung komplett zu verzichten.<sup>3</sup> Eine ökologische Be-

---

<sup>1</sup> Dies entspricht Mehrkosten für Magnesiumgranulat in Höhe von 25% im Vergleich zu Masselmateriale.

<sup>2</sup> Als Ober- bzw. Unterkorn wird dasjenige Granulat bezeichnet, das oberhalb bzw. unterhalb der geometrischen Vorgaben für das Rohmaterial liegt. Darüber hinaus entstehen Stäube, die ebenfalls nicht als Aufgabegut geeignet sind.

<sup>3</sup> Da es sich beim Gießen der Magnesiummasseln um einen offenen Prozeß handelt, wird auch dort SF<sub>6</sub> als Schutzgas benötigt.

wertung des Magnesiumspritzgießens würde dann auch bei der Berücksichtigung der vorgelagerten Prozesse einen weiteren deutlichen Vorteil gegenüber dem Druckgießen aufzeigen können.

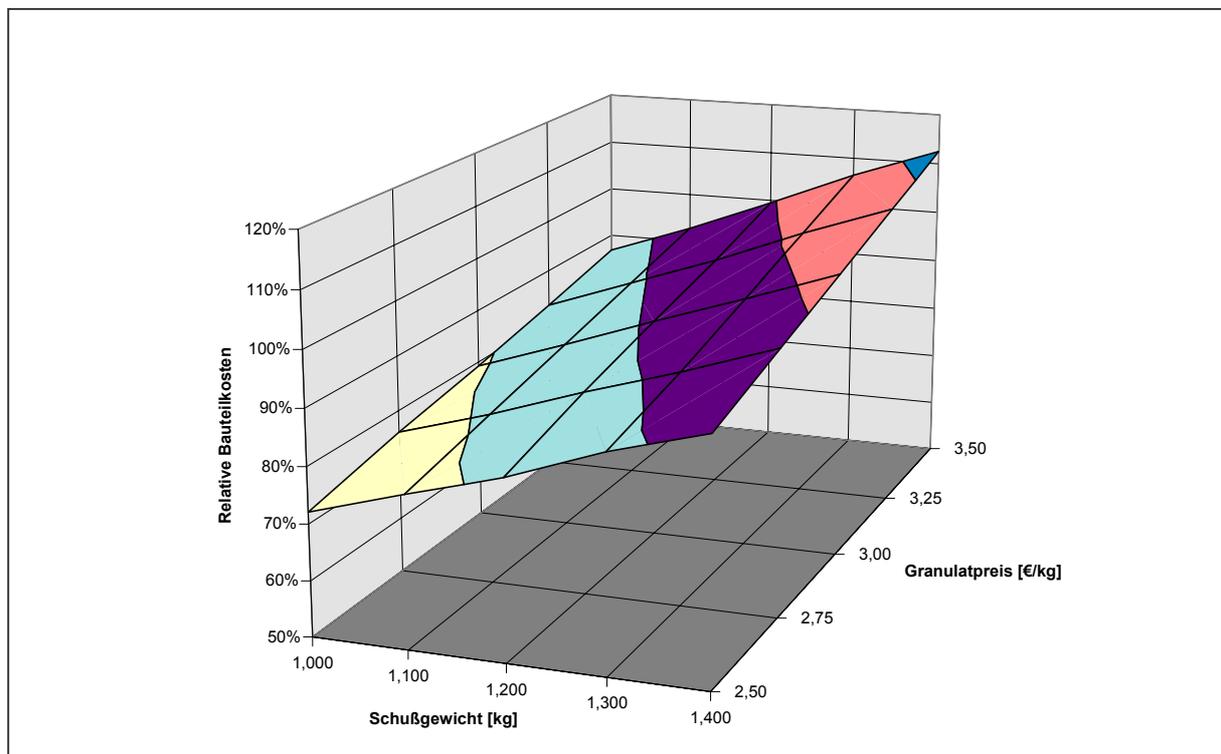


Abb. 55: Einfluß der Rohmaterialkosten und des Schußgewichts auf die Bauteilkosten<sup>1</sup>

In Bezug auf den Einflußfaktor Schußgewicht bestehen bereits heute prinzipielle Möglichkeiten, das erforderliche Materialeinsatzgewicht zu senken, jedoch ist hierzu eine detaillierte Analyse der jeweiligen Bauteilgeometrie und der an das Produkt gestellten Festigkeitsanforderungen erforderlich. Zum einen ist es möglich, durch Optimierungen von Lage und Geometrie des Angusses den Anteil des Kreislaufmaterials am Schußgewicht deutlich zu senken (was beim Druckgießen verfahrensbedingt nur eingeschränkt möglich ist).<sup>2</sup> Zum anderen ist es aufgrund des besseren Formfüllverhaltens bei vielen Bauteile möglich, auf Fließhilfen zu verzichten oder die Wandstärke zu reduzieren.<sup>3</sup> Eine Verringerung der Wandstärke ist vor allem in mechanisch gering belasteten Bauteilbereichen möglich, bei denen der Querschnitt nicht aus Festigkeitsgründen, sondern aufgrund der verfahrensbedingten Grenzen des Druckgießens festgelegt wird. Bei dem von Volkswagen im Rahmen des MADICA-Projekts untersuchten Schaltgehäuse konnte beispielsweise das Bauteilgewicht allein durch eine großflächige Reduzierung der Wandstärken um insgesamt 30% gesenkt werden.

<sup>1</sup> Die Werte beziehen sich auf ein repräsentatives Bauteil von 1kg Gewicht und einer zur Herstellung erforderlichen Zykluszeit von 50 Sekunden (Druckgießen = 100%).

<sup>2</sup> Magnesiumspritzgießen gestattet häufig eine direktere Anbindung des Gußteils, so daß der Anguß deutlich kleiner ausfallen kann.

<sup>3</sup> Fließhilfen werden beim Druckgießen häufig eingesetzt, um Aussparungen zu überbrücken. Sie werden anschließend ausgestanzt und gehen ins Kreislaufmaterial ein.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion des Schußgewichts ist die aus dem Kunststoffspritzgießen bekannte Heißkanaltechnik, bei der ein Anguß komplett entfällt, indem das Bauteil direkt angespritzt wird. Da gerade bei dünnwandigen Bauteilen das Kreislaufmaterial zum Teil über 50% des Schußgewichts ausmacht, ist dieser Ansatz von entscheidender Bedeutung für einen möglichen Kostenvorteil des Magnesiumspritzgießens gegenüber dem Druckgießen. Eine entsprechende technologische Umsetzung des Heißkanals ist in naher Zukunft zu erwarten, zumal bereits erste prototypische Realisierungen nach Angaben des Anlagenherstellers JSW erfolgreich waren.

Eine Verringerung der Ausschußquote wirkt sich sowohl auf die ausbringungs-, als auch auf die zeitabhängigen Flüsse positiv aus, da zum einen weniger Kosten für In- und Outputs entstehen und zum anderen weniger Maschinenkapazität in Anspruch genommen werden muß, um ein vorgegebenes Produktionsvolumen herzustellen. Eine Veränderung der Parameter zeigt jedoch, daß eine weitere Senkung der Ausschußzahlen nur einen vergleichsweise untergeordneten Effekt bringt und daher entgegen der Erwartung kaum relevant ist (Abb. 56).

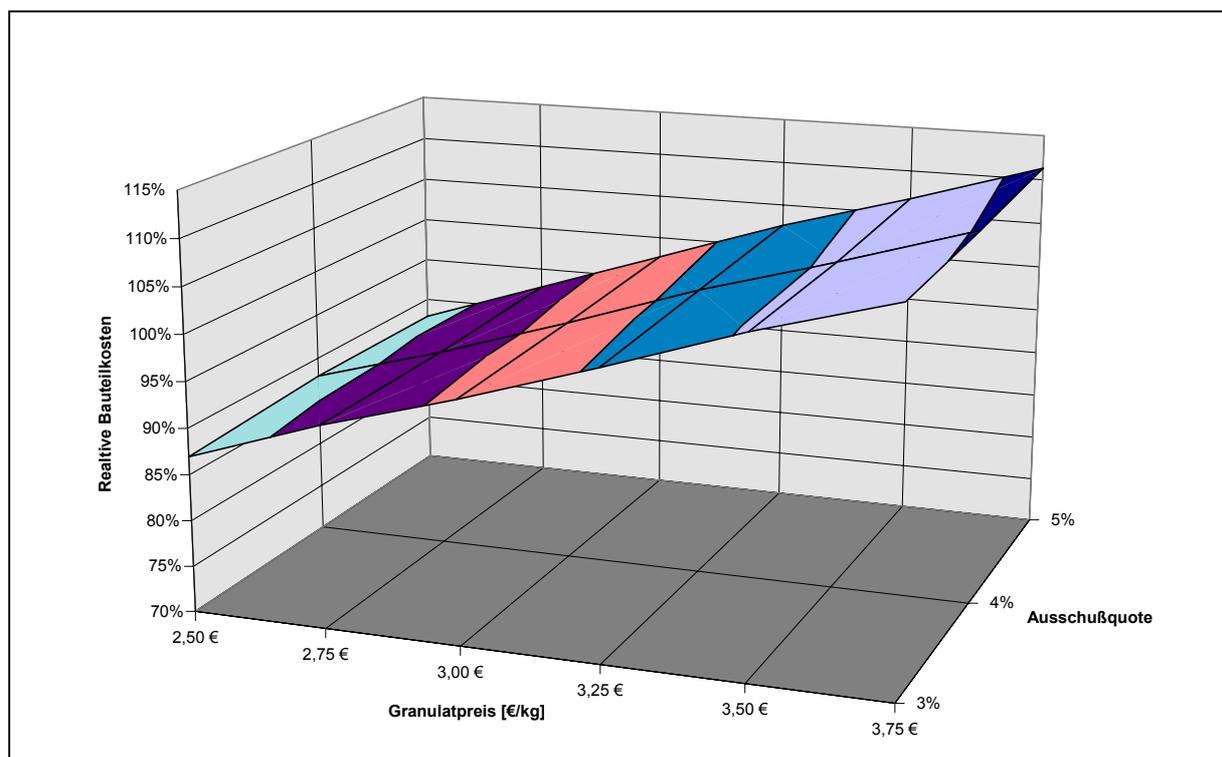


Abb. 56: Einfluß der Kosten für Magnesiumgranulat und der Ausschußquote auf die Bauteilkosten<sup>1</sup>

Bei der Analyse der Kostensenkungspotentiale durch eine Beeinflussung der zeitabhängigen Flüsse bieten die Parameter Zykluszeit, Maschinenkosten, Mehrschichtbetrieb und Anlagenverfügbarkeit Ansatzpunkte zur Variation. Die Ergebnisse zeigen, daß lediglich eine Reduktion der erforderlichen Zykluszeit und der Investitionssumme einen nennenswerten kostensenkenden Effekt haben (Abb. 57).

Dieses Ergebnis überrascht, da bislang die im Vergleich zum Druckgießen deutlich höheren Anlagekosten als ein wesentlicher Grund für einen Kostennachteil des Magnesiumspritzgießen angesehen wurden. Abb. 57 zeigt, daß ein Kostenvorteil gegenüber dem Druckgießen nur dann erreicht werden kann, wenn die Kosten für eine Magnesiumspritzgießmaschine in etwa auf das Niveau einer Druckgießanlage<sup>2</sup> gebracht werden können und wenn es gleichzeitig möglich ist, die Zykluszeiten stark zu reduzieren. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, daß eine Variation von Parametern, die die zeitabhängigen Kosten beeinflussen, weniger effektiv sind, um die derzeit vorhandenen Kostennachteile des Magnesiumspritzgießens aufzuheben.

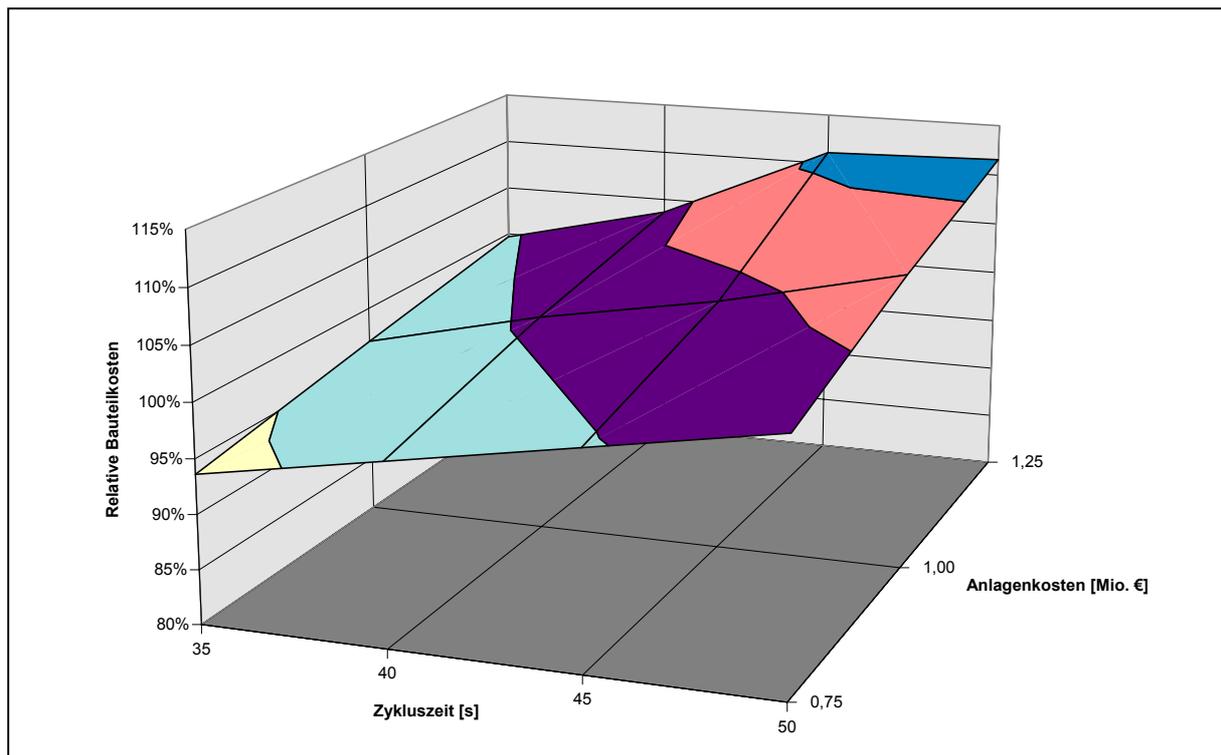


Abb. 57: Einfluß der Zykluszeit und der Anlagekosten auf die Bauteilkosten<sup>3</sup>

Zusätzlich zu den genannten Ansatzpunkten bestehen noch weitere Einsparpotentiale bei nachgelagerten Prozessen. Aufgrund der endkonturnahen Fertigung beim Magnesiumspritzgießen ist es beispielsweise möglich, Bohrungen und Funktionsflächen fertig zu gießen oder den Aufwand zur Vorbereitung von Oberflächen für eine Lackierung auf ein Minimum zu reduzieren.<sup>4</sup> Die hierbei erzielbaren Kos-

<sup>1</sup> Die Werte beziehen sich auf ein repräsentatives Bauteil von 1kg Gewicht und einer zur Herstellung erforderlichen Zykluszeit von 50 Sekunden (Druckgießen = 100%).

<sup>2</sup> Der Kalkulation sind nicht nur die Kosten für die Druckgießmaschine, sondern auch für die Masselvorwärmung und -chargierung zugrunde zu legen. Dies wurde im gesamten Anwendungsbeispiel berücksichtigt.

<sup>3</sup> Die Werte beziehen sich auf ein repräsentatives Bauteil von 1kg Gewicht und einer zur Herstellung erforderlichen Zykluszeit von 50 Sekunden (Druckgießen = 100%).

<sup>4</sup> Ein Beispiel hierfür ist eine Schaltnocke für ein Getriebe (Ford, USA), bei der durch eine Eliminierung einer spanenden Nachbearbeitung, daß sowohl die Mehrkosten des Magnesiumspritzgießprozesses, als auch die mit der Umstellung von Aluminium auf Magnesium verbundenen höheren Kosten kompensiert werden konnten.

teneinsparungen sind jedoch vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig und nicht allgemeingültig quantifizierbar.

Zusammenfassend zeigt die Diskussion und Analyse der Ergebnisse, daß die Technologie des Magnesiumspritzgießens geeignet ist, die Umweltwirkungen, die mit der Produktion von Magnesiumbauteilen verbunden sind, zu senken. Bei einem eng gefaßten Untersuchungsrahmen und der Konzentration auf unternehmenseigene Prozesse kann der Effekt durchaus als bedeutend bezeichnet werden. Hinsichtlich des derzeit vorhandenen Kostennachteils gegenüber dem Druckgießen konnten eine ganze Reihe von Ansatzpunkten für eine Weiterentwicklung der Technologie aufgezeigt werden, mit denen auch eine wirtschaftliche Überlegenheit erreicht werden kann.

Für die in Tab. 24 und den folgenden Abbildungen dargestellten Ergebnisse wurden die effektivsten der zuvor diskutierten Ansätze im Sinne eines "Best-Case"-Szenarios zusammengefaßt, um die Potentiale der Technologie darzustellen. Hierzu wurden die Annahme getroffen, daß es mittelfristig möglich ist, die Anlagekosten auf das Niveau einer Druckgießmaschine zu reduzieren, die Materialeinsatzmenge verfahrensbedingt und unter Einsatz der Heißkanaltechnologie um 20% und die Zykluszeit um 10% zu verringern sowie durch eine Erhöhung der Nachfrage und Änderung der Herstellprozesse Magnesiumgranulat für 3,10 €/kg auf dem Weltmarkt zu beziehen.

Magnesiumspritzgießen			Druckgießen		
<b>Umweltwirkungsindex (UWI) ohne vor- und nachgelagerte Prozesse</b>					
ausbringungsabhängig	10,87 *10 <sup>-14</sup> /kg	57%	19,24 *10 <sup>-14</sup> /kg	100%	
produktartabhängig	0,00 *10 <sup>-14</sup> /Stk	-	0,00 *10 <sup>-14</sup> /Stk	-	-
zeitabhängig	0,24 *10 <sup>-14</sup> /h	0%	1224,00 *10 <sup>-14</sup> /h	100%	
<b>Umweltwirkungsindex (UWI) inkl. vor- und nachgelagerte Prozesse</b>					
ausbringungsabhängig	280166 *10 <sup>-14</sup> /kg	79%	353298 *10 <sup>-14</sup> /kg	100%	
produktartabhängig	0,00 *10 <sup>-14</sup> /Stk	-	0,00 *10 <sup>-14</sup> /Stk	-	-
zeitabhängig	1,13 *10 <sup>-14</sup> /h	0%	1228,29 *10 <sup>-14</sup> /h	100%	
<b>Produktionsprozeßkosten (PPK)</b>					
ausbringungsabhängig	3,44 €/kg	103%	3,35 €/kg	100%	
produktartabhängig	0,81 €/Stk	46%	1,74 €/Stk	100%	
zeitabhängig	130,02 €/h	81%	159,67 €/h	100%	

Tab. 24: Potentiale des Magnesiumspritzgießens bei einer konsequenten Weiterentwicklung der Technologie des Magnesiumspritzgießens - Prozeßsätze

---

Zudem konnte das zuvor aus fertigungstechnischen Gründen zweiteilige Bauteil zu einer Komponente integriert werden.

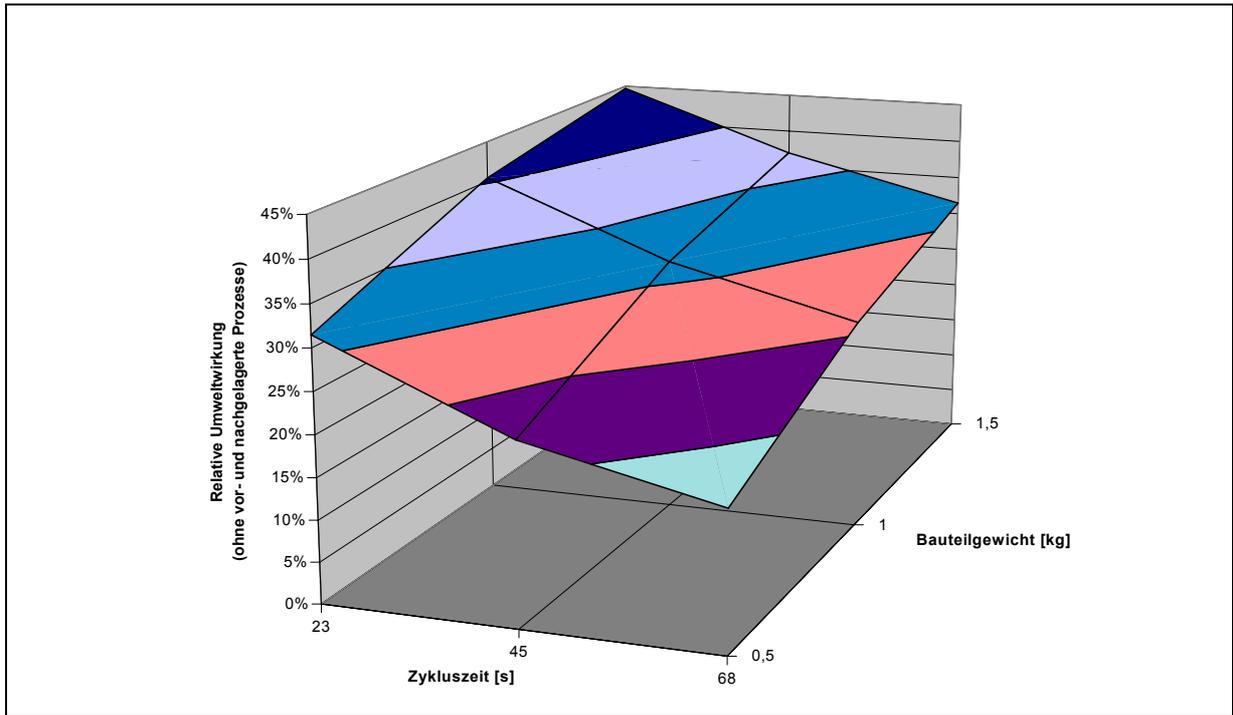


Abb. 58: Potentiale des Magnesiumspritzgießens bei einer konsequenten Weiterentwicklung der Technologie - Relative Umweltwirkungen (Druckgießen = 100%)

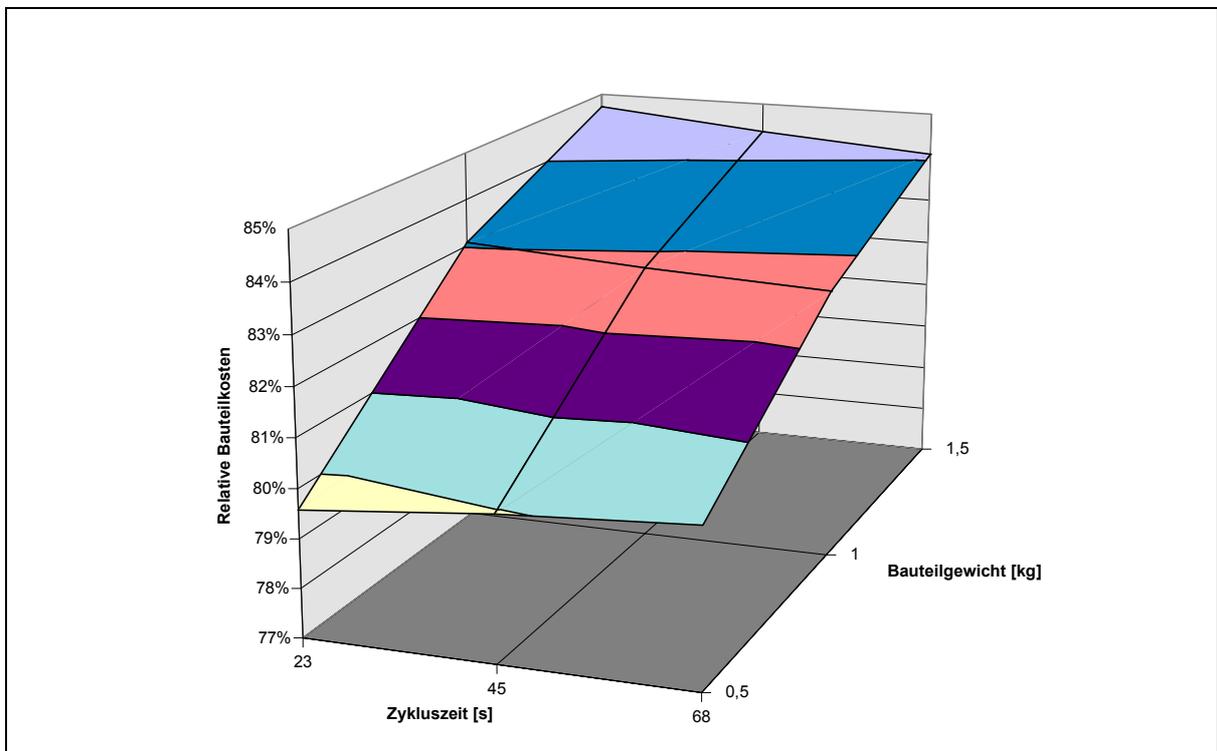


Abb. 59: Potentiale des Magnesiumspritzgießens bei einer konsequenten Weiterentwicklung der Technologie - Relative Bauteilkosten (Druckgießen = 100%)

Wenn es gelingt, die genannten Voraussetzungen zu erfüllen, dann ist es mit der Technologie des Magnesiumspritzgießens möglich, sowohl die mit der Herstellung von Magnesiumbauteilen verbundenen Umweltwirkungen, auch die Produktionsprozeßkosten deutlich unter das Niveau der mit dem Druckgießen erzielbaren Ergebnisse zu senken. Hieraus ergibt sich für ein Unternehmen, das bereits Magnesiumbauteile im Druckgießen herstellt, die Empfehlung, die Entwicklung der Technologie genau zu verfolgen bzw. nach Möglichkeit in die aufgezeigte Richtung zu beeinflussen (vgl. Abb. 60). Die exemplarische Technologiebewertung belegt die Anwendungsmöglichkeiten und die Flexibilität der Methode der Integrierten Bewertung. Insbesondere die Diskussion der Entwicklungspotentiale des Magnesiumspritzgießens verdeutlicht den Vorteil einer durchgängigen und flußorientierten Modellierung und Rechnung, da hierdurch die Zusammenhänge zwischen Flüssen, Umweltwirkungen und Kosten aufgezeigt werden können. Zum einen wird hierdurch eine einfache Analyse der wichtigsten für das Gesamtergebnis relevanten Parameter möglich, und zum anderen können die Auswirkungen von Parameteränderungen auf die Entscheidungsgrößen Umweltwirkungsindex UWI und Produktionsprozeßkosten PPK im Sinne von "What-if"-Szenarien schnell und einfach quantifiziert werden.

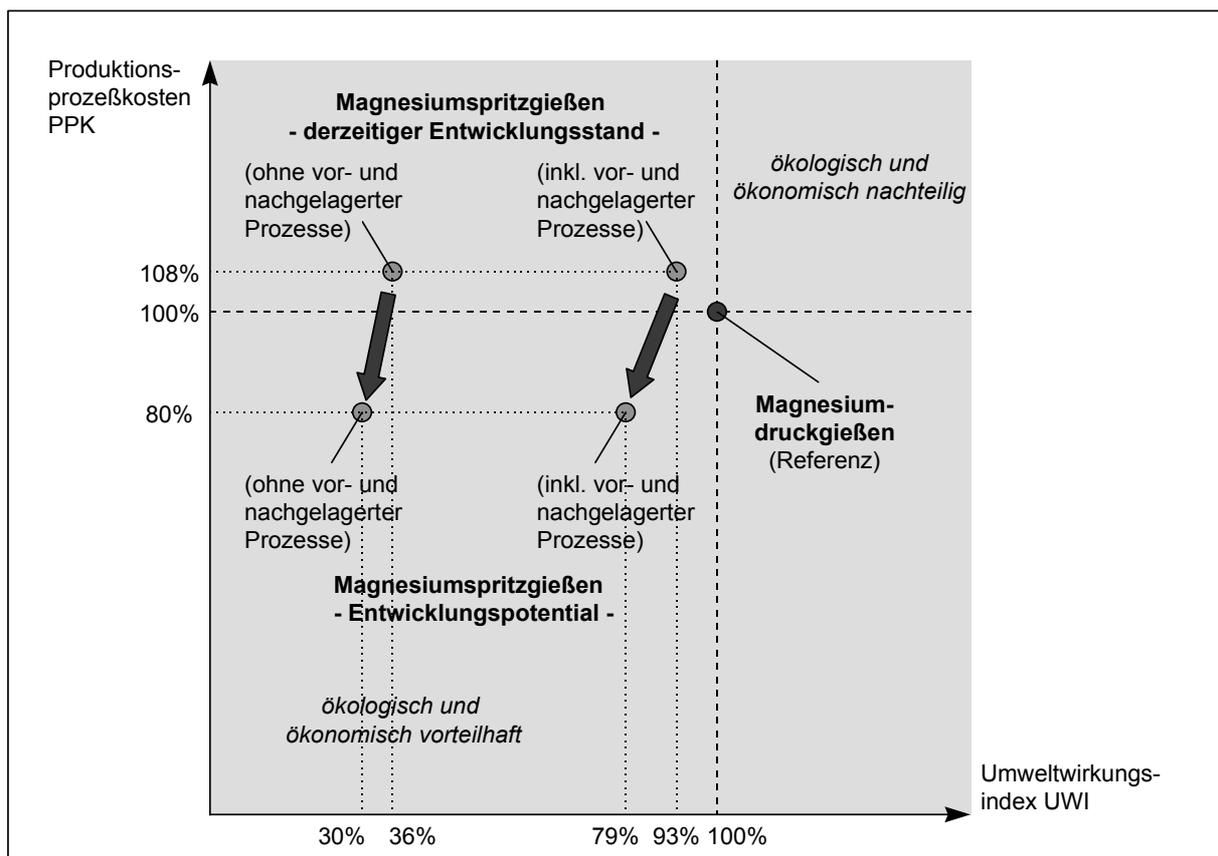


Abb. 60: Potentiale des Magnesiumspritzgießens bei einer konsequenten Weiterentwicklung der Technologie - Ergebnisgrößen UWI und PPK für ein repräsentatives Bauteil<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Beispielkalkulation für ein repräsentatives Bauteil von 1 kg Masse; Zykluszeit Magnesiumspritzgießen 45 Sekunden gegenüber 50 Sekunden beim Druckgießen (Werte für das Druckgußbauteil = 100%).

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Die Umsetzung des Leitbilds "Nachhaltige Entwicklung" und die Erfüllung der Selbstverpflichtung des Öko-Audits, betrieblichen Umweltschutz durch den Einsatz der besten verfügbaren Technologien über das gesetzlich vorgeschriebene Maß hinaus zu betreiben, stellt für Unternehmen eine große Herausforderung dar. Effizienter Ressourceneinsatz und die Vermeidung von Emissionen und Abfällen anstelle nachsorgender und kostenintensiver "End-of-pipe"-Maßnahmen sind Kennzeichen und Ziele eines integrierten Umweltschutzes, die zugleich Kosteneinsparungen ermöglichen. Die größten Potentiale zur Erschließung von Synergien zwischen Ökologie und Ökonomie bietet eine frühzeitige Berücksichtigung von Umwelt- und Kostenaspekten im Rahmen der taktischen Produktionsplanung.

Eine Analyse zum Stand der Methodenentwicklung zeigt allerdings gerade für dieses Anwendungsgebiet ein Defizit an geeigneten Methoden und Ansätzen. Wesentliche Schwachpunkte sind mangelnde Prozeßorientierung, ungenügende Planungsunterstützung aufgrund einer primär operativen Ausrichtung sowie unzureichende Eignung zur Beurteilung von (neuen) Produktionstechnologien. Darüber hinaus bestehen Schwachstellen hinsichtlich einer verursachungsgerechten Datenermittlung und der Integration von ökologischer und ökonomischer Bewertung. Hinzu kommt, daß Bewertungslogiken und Datenbasen nicht aufeinander abgestimmt sind, woraus sich ein erhöhter Aufwand für die Datenermittlung, Inflexibilität und Inkonsistenzen bei Änderungen der Planungsgrundlagen ergeben. Des Weiteren ist es nicht möglich, Zusammenhänge zwischen Kosten und Umweltwirkungen oder Einflußfaktoren zu ihrer Verbesserung aufzuzeigen.

Im Gegensatz dazu ermöglicht die in dieser Arbeit vorgestellte Methode eine Integration von ökologischer und ökonomischer Bewertung, um bei zukünftigen betrieblichen Entscheidungen beide Aspekte gleichermaßen berücksichtigen zu können. Mit ihrer Hilfe lassen sich die Umweltwirkungen und Kosten von Produktionsprozessen verursachungsgerecht ermitteln und bewerten. Darüber hinaus kann die Methode auch zur Beurteilung der ökologischen und ökonomischen Vor- und Nachteile neuer Produktionstechnologien im Vergleich zu etablierten Verfahren oder Zielvorgaben eingesetzt werden.

Der Fokus liegt auf Anwendungen im Rahmen der taktischen Produktionsplanung, um das Produktionsmanagement bei der Bewertung neuer Produktionstechnologien, bei Investitionsentscheidungen oder der Planung von Produktionsprozessen in die Lage zu versetzen, Alternativen ganzheitlich zu bewerten und die optimale Gesamtlösung zu identifizieren.

Die Methode basiert auf dem Grundgedanken, daß eine ökologische bzw. ökonomische Bewertung unterschiedliche Sichtweisen des untersuchten Prozesses darstellen, da sich sowohl Umweltwirkungen, als auch Kosten auf die In- und Outputs des Prozesses zurückführen lassen. Im Mittelpunkt steht daher die Verwendung einer gemeinsamen Datenbasis, die mit Hilfe eines integrierten Prozeßmodells ermittelt wird. Dieses vereinigt aus der Ökobilanzierung bekannte Stoff- und Energieflußmodelle mit einem modifizierten Prozeßmodell der Betriebswirtschaftslehre. Aus den auf diese Weise ermittelten

Grunddaten werden dann die ökologischen und ökonomischen Bewertungsgrößen "Umweltwirkungen" und "Kosten" berechnet, die anschließend zu Entscheidungsgrößen verdichtet werden. Zur Ausgestaltung und Operationalisierung des Konzepts wird ein aus Grund- und Auswertungsrechnung bestehendes Integriertes Rechnungswesen vorgestellt.

Die Grundrechnung umfaßt die Komponenten Flußarten-, Umweltwirkungsarten und Kostenartenrechnung und dient der Ermittlung der vom zu bewertenden Prozeß verursachten Umweltwirkungen und Kosten. Im Rahmen der Flußartenrechnung erfolgt zunächst eine quantitative Abbildung des Untersuchungsobjekts mit Hilfe des Prozeßmodells und einem integrierten Kontenplan zur klassifizierten Erfassung der Flüsse. Anschließend werden die ermittelten Flußgrößen unter Berücksichtigung von Zurechnungsstufen, Ausbringungs- und Zeitabhängigkeit verursachungsgerecht auf Bezugsgrößen verrechnet, die sich am jeweiligen Bewertungsziel orientieren. Für Technologie-, Investitions- oder Prozeßbewertungen stehen entsprechende Verrechnungsregeln zur Verfügung. Der Vorteil der frühen Verrechnung bereits im Rahmen der Flußartenrechnung besteht darin, daß die nachfolgenden Umweltwirkungsarten- und Kostenartenrechnungen auf denselben Grunddaten aufsetzen. Da die bereits verrechneten Flußgrößen als Bindeglied der beiden Rechnungsarten fungieren, sind Inkonsistenzen ausgeschlossen und Einflußgrößen auf die Ergebnisse der ökologischen und ökonomischen Bewertung lassen sich leicht analysieren.

Mit Hilfe der Auswertungsrechnung werden die Ergebnisse der Grundrechnung anschließend zu je einer ökologischen und ökonomischen Entscheidungsgröße verdichtet. Die Aggregation der Umweltdaten erfolgt dabei unter Anwendung der allgemein anerkannten Vorgehensweise der Normalisierung und Gewichtung. Mit dem Umweltwirkungsindex UWI und den Produktionsprozeßkosten PPK werden zwei aussagekräftige und eindeutig zu optimierende Größen definiert, die speziell auf die Belange einer Prozeßbewertung zugeschnitten sind und die Entscheidungssituation transparent aufbereiten.

Eine weitere Aggregation zu einer einzigen Ergebnisgröße erfolgt nicht, da es sich bei ökologischen und ökonomischen Zielen um eigenständige Wertvorstellungen handelt, die nicht in einen kausalen Zusammenhang zueinander gebracht werden können. Zudem wird ein derartiger Schritt in der Wissenschaft allgemein abgelehnt. Statt dessen erfolgt die Ableitung einer zusammenfassenden Bewertungsaussage durch einen Vergleich der beiden Ergebnisgrößen mit Alternativen oder Zielvorgaben. Durch die Verdichtung der Daten erst zu einem späten Zeitpunkt bleibt das gesamte Bewertungsverfahren transparent und nachvollziehbar. Die klare Abgrenzung von Grund- und Auswertungsrechnung gewährleistet zudem eine Trennung von Sach- und Wertebene.

Für die Anwendung der Methode der Integrierten Bewertung steht eine allgemeine Vorgehensweise zur Verfügung, wobei auf die jeweiligen Besonderheiten einer Technologie-, Investitions- und Prozeßbewertung eingegangen wird. Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit ist der in diesem Zusammenhang vorgestellte "allgemeine Prozeßsatz", der eine universelle Ergebnisgröße zur Charakterisierung und Bewertung von Produktionstechnologien darstellt und auf typische Fragestellungen der taktischen Produktionsplanung angewandt werden kann. Mit seinen beiden Komponenten Ausbringungs- und

Zeitverrechnungssatz ist zudem die Berücksichtigung wichtiger ergebnisbestimmender Parameter und Randbedingungen der Produktionsaufgabe möglich.

Für die neue Produktionstechnologie des Magnesiumspritzgießens wird die Ermittlung und Anwendung des Prozeßsatzes exemplarisch dargestellt. Hintergrund sind die starken Wachstumsraten des Einsatzes von Magnesium in der Automobilindustrie und bereits belegte bzw. erwartete technologische, ökologische und ökonomische Vorteile der neuen Technologie. Als Vergleichsbasis dient dabei das etablierte Verfahren des Magnesiumdruckgießens. Für ein repräsentatives Bauteil zeigen die Bewertungsergebnisse in ökologischer Hinsicht einen Vorteil des Magnesiumspritzgießens, jedoch einen leichten Kostennachteil gegenüber dem Druckgießen. Eine Analyse und Bewertung der Entwicklungspotentiale der neuen Technologie verdeutlicht die Vorteile einer gemeinsamen Datenbasis und der Verwendung von Parametern bei der Datenmodellierung: Durch einfache Parametervariationen im Sinne von "What-If"-Untersuchungen lassen sich ohne großen Aufwand diejenigen Randbedingungen ermitteln, unter denen Magnesiumspritzgießen auch in ökonomischer Hinsicht deutliche Wettbewerbsvorteile gegenüber der etablierten Technologie bietet. Die identifizierten Ansatzpunkte können als Grundlage für eine zielgerichtete Weiterentwicklung der neuen Technologie genutzt werden.

Mit der in dieser Arbeit entwickelten Methode der integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung steht dem Produktionsmanagement ein Instrument zur Verfügung, das bei der zukunftsorientierten Gestaltung ganzheitlich optimaler Produktionsprozesse im Rahmen der taktischen Planung eingesetzt werden kann. Die auf einer gemeinsamen Datenbasis aufbauende prozeßorientierte und verursachungsgerechte Ermittlung der Bewertungsgrößen sowie deren anschließende transparente Verdichtung zu den Entscheidungsgrößen "Umweltwirkungsindex" und "Produktionsprozeßkosten" gestatten eine systematische und miteinander verzahnte ökologische und ökonomische Bewertung.

Eine Herausforderung für die Zukunft besteht darin, die für derartige Bewertungen erforderlichen Daten und Informationen im Rahmen der ständigen Weiterentwicklung von Umwelt- und Kostenmanagementsystemen im benötigten Detaillierungsgrad zur Verfügung zu stellen. Bis zu dem Zeitpunkt wo derartige Informationen "auf Knopfdruck" zur Verfügung stehen, wäre die Entwicklung von Ansätzen zur Reduzierung des Aufwands bei der Datenerhebung wünschenswert, wie z.B. Methoden zur systematischen Schätzung oder zum überschlägigen Berechnung der Flußgrößen. Eine entsprechend schnelle Verfügbarkeit der benötigten Daten und Informationen vorausgesetzt, ist auch eine Weiterentwicklung der vorgestellten Bewertungsmethode zu Projektsteuerungsinstrumenten denkbar. Derartige Werkzeuge könnten dann dazu eingesetzt werden, bereits während der Entwicklung neuer Produktionstechnologien sicherzustellen, daß diese nicht nur die technologischen Anforderungen erfüllen, sondern zugleich die Auswirkungen auf die Umwelt und die Kosten ihres Einsatzes minimiert werden. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit und dem Einsatz entsprechender Methoden und Instrumente in der betrieblichen Praxis wird zugleich ein Betrag geleistet zur schrittweisen Aufhebung der Grenzen zwischen den unterschiedlichen Managementansätzen und zu einer ganzheitlichen Unternehmensführung.

## Literaturverzeichnis

- [Ackermann 1999] Ackermann, Robert; Marsen, Tobias:  
Stoffkreislaufschließung bei der Warenentmetallisierung - Ökologische und ökonomische Beurteilung und Optimierung  
In: Galvanotechnik 90 (1999), Nr. 3, S. 818-828
- [Ahrend 1995] Ahrend, Wagenhaus, Volkholz:  
Fabrikplanung und Ökologie  
In: umwelt&technik, (1995), Nr. 4, S. 46-48
- [Ahrend 1996] Ahrend, Hans-Werner; Wagenhaus, Gerd:  
Zur Fabrikökologie in der Fraktalen Fabrik  
In: wt – Produktion und Management 86 (1996), S. 124-126
- [Ahrend 1999] Ahrend, Hans-Wolfgang; Grundig, Claus-Gerold:  
Ökologie und Ökonomie - Impressionen  
In: Umwelt, 29 (1999), Nr. 3, S. 35-39
- [AWK, 1999] AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium; Eversheim, Walter (Hrsg.):  
Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik - Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium '99, Aachen, 1999  
Aachen: Shaker, 1999
- [AZ 2000] o.V.:  
Vom Lupo zum Drei-Liter-Lupo  
In: Auto-Zeitung vom 10.05.2000
- [Baden 1998] Baden, Axel:  
Die strategische Kostenrechnung - Eine "revolutionäre Umorientierung des internen Rechnungswesens"?  
In: ZfB 68 (1998), Nr. 6, S. 605-626

- [Barankay 2000] Barankay, Thomas; Jürgens, Gunnar; Rey, Uwe:  
Kostentreiber aufgedeckt – Stoffstrom-Management macht versteckte Reststoffkosten sichtbar  
In: FB/IE (2000), Nr. 4, S. 175-177
- [Baumast 2001] Baumast, A.; Pape, J. (Hrsg.):  
Betriebliches Umweltmanagement - Theoretische Grundlagen, Praxisbeispiele  
Stuttgart: Ulmer, 2001
- [Behnsen 1996] Behnsen, Jörg:  
Die Umweltkostenrechnung im Rahmen des ökologieorientierten Controllings am Beispiel eines Automobilherstellers  
Diplomarbeit, Uni Hannover, unveröffentlicht, 1996
- [Birkhofer 2000] Birkhofer, Herbert; Grüner, Chris:  
Umweltgerechte Produktentwicklung - Das Umweltmanagement als Steuerungsinstrument  
In: ZWF (2000), Nr. 5, S. 230-233
- [Böhlke 1994] Böhlke, Uwe H.:  
Rechnerunterstützte Analyse von Produktlebenszyklen – Entwicklung einer Planungsmethodik für das umweltökonomische Technologiemanagement  
Berichte aus der Produktionstechnik; Bd. 22/94  
Aachen: Shaker, 1994; zugl. Diss., RWTH Aachen, 1994
- [Bouscaren 2000] Bouscaren, Rémy:  
Clean Technologies and Application to Environmental Pollution Control  
In: Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.), Professional Congress Environment, Climate, Health, 2000, S. 73-82
- [Bradley 1991] Bradley, N.; Wieland, R.; Schafer, W.; Niemi, A.:  
Method and apparatus for the injection molding of metal alloys  
US Patent No. 5.040.589, 1991
- [Bronner 1964] Bronner, Albert:  
Vereinfachte Wirtschaftlichkeitsrechnung  
Berlin u.a.: Beuth, 1964

- [Brunnhuber 1991] Brunnhuber, Ernst:  
Praxis der Druckgußfertigung, 4. Aufl.  
Berlin: Schiele und Schön, 1991
- [Buchgeister 1998] Buchgeister, J.; Horvath, G.; Wittkowsky, A.:  
Vergleichende Verfahrensökobilanz - Beispiel: Thermochemische Wärmebehandlungsverfahren  
In: HTM 53(1998), S. 63-66
- [Bullinger 1998] Bullinger, H.-J., et al. (Hrsg.):  
Betriebliche Umweltinformationssysteme in Produktion und Logistik  
Workshop der Fachgruppe 4.6.2/5.4.3 "Betriebliche Umweltinformationssysteme" der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI-FG BUIS), 1998  
Marburg: Metropolis Verlag, 1998
- [Bullinger 1999a] Bullinger, H.-J.; Beuker, S.; Jürgens, G.:  
Integriertes Stakeholdermanagement - Herausforderungen für eine zukunftsfähige und nachhaltige Unternehmensführung  
In: ZWF (1999), Nr. 9, S. 514-516
- [Bullinger 1999b] Bullinger, H.-J.; Hecht, S.; Steinaecker, J. v.; Jürgens, G.:  
Dezentrales Umweltmanagement - Am Beispiel der Herstellung von blechbearbeitenden Werkzeugmaschinen  
In: ZWF (1999), Nr. 1-2, S. 48-50
- [Bullinger 2000a] Bullinger, H.-J.; Barnakay, T.; Jürgens, G.; Rey, U.:  
Aufdecken von Reststoffkosten - Kostentreiber im betrieblichen Umweltschutz  
In: ZWF (2000), Nr. 5, S. 226-229
- [Bullinger 2000b] Bullinger, H.-J., Eversheim, W., Haasis, H.-D., Klocke, F. (Hrsg.):  
Auftragsabwicklung optimieren nach Umwelt- und Kostenzielen  
Berlin u.a.: Springer, 2000
- [BUM/UBA 1996] Bundesumweltministerium; Umweltbundesamt (Hrsg.):  
Handbuch Umweltkostenrechnung  
München: Vahlen, 1996

- [BUM/UBA 1997] Bundesumweltministerium; Umweltbundesamt (Hrsg.):  
Leitfaden betriebliche Umweltkennzahlen  
München: 1997
- [BUM/UBA 2001] Bundesumweltministerium; Umweltbundesamt (Hrsg.):  
Handbuch Umweltcontrolling, 2. Aufl.  
München: Vahlen, 2001
- [Carnahan 1995] Carnahan, R.D.; Decker, R.F.; Vining, R.; Eldener, E.; Kilbert, R.; Brinkley, D.:  
Influence of solid fraction on the shrinkage and physical properties of thixo-  
molded Mg alloys  
In: Die Casting Engineer (1996), Nr. 5/6, S. 54-59
- [Dangelmaier 1999] Dangelmaier, Wilhelm:  
Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung - Grundlagen, Algorithmen und  
Beispiele  
Berlin u.a.: Springer, 1999
- [Dellmann 1994] Dellmann, Klaus; Franz, Klaus-Peter:  
Von der Kostenrechnung zum Kostenmanagement  
In: Dellmann, Klaus; Franz, Klaus-Peter (Hrsg.), Neuere Entwicklungen im  
Kostenmanagement, 1994, S. 15-30  
Bern, u.a.: Haupt, 1994
- [DIN 33926, 1996] Norm DIN 33926 (Entwurf):  
Produktbezogene Ökobilanzen - Standardberichtsbogen  
Berlin: Beuth, 1996
- [Dubbel 2001] Dubbel, H.; Beitz, W.; Grote, K.-H.:  
Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 20. Aufl.  
Berlin, u.a.: Springer, 2001
- [Dworog 1999a] Dworog, A.; Hartmann, D.:  
Thixomolding - Neue Märkte für Spritzgießer  
In: KU Kunststoffe 89 (1999), Nr. 3, S. 34-37
- [Dworog 1999b] Dworog, A.; Huppertz, R.; Hartmann, D.:

Magnesiumspritzgießen

In: KU Kunststoffe 89 (1999), Nr. 3, S. 75-78

- [Dworog 2001] Dworog, A.; Hartmann, D.; Kothen, M.:  
Magnesiumspritzgießen (Thixomolding): Herausforderung für den Magnesium-  
verarbeiter!?  
In: Technische Akademie Esslingen, Ostfildern-Nellingen (Hrsg.), Thixofor-  
ming, 2001, S. 1-25
- [Dyckhoff 1991] Dyckhoff, Harald:  
Berücksichtigung des Umweltschutzes in der betriebswirtschaftlichen Produkti-  
onstheorie  
In: Ordelheide, Dieter; Rudolph, Bernd; Büselmann, Elke (Hrsg.), Betriebs-  
wirtschaftslehre und ökonomische Theorie, 1991
- [Dyckhoff 2000] Dyckhoff, Harald:  
Grundzüge der Produktionswirtschaft – Einführung in die Theorie betrieblicher  
Wertschöpfung, 3. Aufl.  
Berlin, u.a.: Springer, 2000
- [Eberle 1999] Eberle, Reinhard:  
Die ökologischen und ökonomischen Grenzen des Leichtbaus  
In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), VDI-Bericht  
1505, 1999, S. 55-79
- [Eberle 2000] Eberle, Reinhard:  
Methodik der ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau  
Berlin: Schriftenreihe B (Fahrzeugtechnik) des Inst. für Schienen- und Straßen-  
verkehr, 2000; zugl. Diss., TU Berlin, 2000
- [Edgar 2000] Edgar, R.L.:  
Global Overview on Demand and Applications for Magnesium Alloys  
In: Kainer, K. (Hrsg.), Magnesium Alloys and their Applications, 2000, S. 3-8

- [Engelhart 1999] Engelhart, D.; Mödl, C.:  
Die Entwicklung des Audi A2, ein neues Fahrzeugkonzept in der Kompaktwagenklasse  
VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.) [VDI-Bericht 1505, 1999, S. 11-21
- [Enquête 1994] Enquête-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt" des Deutschen Bundestages (Hrsg.):  
Die Industriegesellschaft gestalten - Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und Materialströmen  
Bericht der Enquête-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt - Bewertungskriterien und Perspektiven für umweltverträgliche Stoffkreisläufe in der Industriegesellschaft" des 12. Deutschen Bundestages  
Bonn: Economica, 1994
- [Eversheim 1994] Eversheim, Walter; Humburger, Rainer; Pollack, Alexander [Kalkulation, 1994]:  
Wirtschaftlicher Verfahrensvergleich mit prozeßorientierter Kalkulation  
In: io Management Zeitschrift 63 (1994), Nr. 5, S. 41-46
- [Eversheim 1995] Eversheim, Walter:  
Prozeßorientierte Unternehmensorganisation - Konzepte und Methoden zur Gestaltung "schlanker" Organisationen  
Berlin, u.a.: Springer, 1995
- [Eversheim 1996] Eversheim, Walter; Albrecht, Thorsten:  
Erstellung von Substitutionskriterien für Verfahren und Werkstoffe  
In: Sonderforschungsbereich 144 der DFG an der RWTH Aachen (Hrsg.), Abschlußkolloquium, 1996, S. 55-90
- [Eversheim 1999] Eversheim, Walter; et. al.:  
Integrierter Umweltschutz - Ein strategischer Erfolgsfaktor  
In: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium; Eversheim, Walter (Hrsg.), Produktionstechnik, 1999, S. 49-72

- [EWG 1993] Verordnung (EWG) Nr. 1836/93:  
Verordnung (EWG) Nr. 1836/93 des Rates vom 29.Juni1993 über die freiwillige Beteiligung gewerblicher Unternehmen an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung  
In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 168/1; 10.07.1993
- [Eyerer 1996a] Eyerer, Peter:  
Gegenüberstellung der Methodik Ganzheitliche Bilanzierung - Kumulierter Energieverbrauch (KEV)  
In: Eyerer, Peter (Hrsg.), Ganzheitliche Bilanzierung - Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen, 1996, S. 179-181
- [Eyerer 1996b] Eyerer, Peter (Hrsg.):  
Ganzheitliche Bilanzierung - Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen  
Berlin, u.a.: Springer, 1996
- [Faßbender 2001] Faßbender-Wynands, Ellen; Seuring, Stefan:  
Umweltcontrolling und Umweltkostenrechnung  
In: Baumast, A.; Pape, J. (Hrsg.), Umweltmanagement, 2001, S. 139-153
- [Fichter 1997] Fichter, Klaus; Loew, Thomas, Seidel, Eberhard:  
Betriebliche Umweltkostenrechnung - Methoden und praxisgerechte Weiterentwicklung  
Berlin, u.a.: Springer, 1997
- [Fleischer 1999] Fleischer, Günter et al.:  
Verbundvorhaben Stoffkreislaufschließung bei abtragenden Verfahren in Prozeßlösungen, Teilprojekt 14: Ökologische und ökonomische Beurteilung und Optimierung, Endbericht 1. Projektphase zum BMFT-Verbundvorhaben Stoffkreislaufschließung bei abtragenden Verfahren in Prozeßlösungen, Teilprojekt 14: Ökologische und ökonomische Beurteilung und Optimierung  
Berlin: TU Berlin, 1999 - Forschungsbericht

- [Forum 1998] Forum Info 2000:  
Herausforderung 2025 - Auf dem Weg in eine nachhaltige Informationsgesellschaft  
Forum Info 2000, Bonn, Arbeitsgruppe 3 "Nachhaltige Entwicklung und Umweltschutz durch Telematikanwendung" und Information Society Forum, Brüssel, Arbeitsgruppe 4 "Sustainability in an Information Society", in Kooperation mit dem EU-Projekt ASIS (Alliance for a Sustainable Information Society)  
Bonn, Brüssel: 1998
- [Friedrich 1996] Friedrich, Rainer:  
Weitere Methoden zur Bewertung von Sachbilanzergebnissen (IER-Ansatz)  
In: Eyerer, Peter (Hrsg.), Ganzheitliche Bilanzierung - Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen, 1996, S. 267-290
- [Gege 1997] Gege, Maximilian (Hrsg.):  
Kosten senken durch Umweltmanagement  
München: Vahlen, 1997
- [Giegrich 1995a] Giegrich, Jürgen:  
Die Bilanzbewertung in produktbezogenen Ökobilanzen  
In: Schmidt, Mario; Schorb, Achim (Hrsg.), Stoffstromanalysen, 1995
- [Giegrich 1995] Giegrich, Jürgen; Mampel, Ulrich; Duscha, Markus:  
Bilanzbewertung in produktbezogenen Ökobilanzen - Evaluation von Bewertungsmethoden, Perspektiven  
In: Umweltbundesamt (Hrsg.), Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen, 1995
- [Grahl 1995] Grahl, B.; Schmincke, E:  
Bewertungs- und Entscheidungsprozesse im Rahmen der Ökobilanz  
In: UWSF-Z. Umweltchem. Ökotox. (1995), Nr. 7, S. 110-113
- [Grimminger 1999] Grimminger, Roland:  
Erstellung und Vergleich der Ökobilanzen von Magnesium- und Aluminium-Bauteilen im Automobilbau  
Diplomarbeit, FH Braunschweig/Wolfenbüttel, 1999, unveröffentlicht

- [Hartmann 1993] Hartmann, Michael:  
Entwicklung eines Kostenmodells für die Montage - Ein Hilfsmittel zur Montageanlagenplanung  
Berichte aus der Produktionstechnik; Bd. 93/7  
Aachen: Shaker, 1993; zugl. Diss., RWTH Aachen, 1993
- [Heinen 1991] Heinen, Edmund:  
Industriebetriebslehre - Entscheidungen im Industriebetrieb, 9. Aufl.  
Wiesbaden: Gabler, 1991
- [Heinrich 1994] Heinrich, Lutz J.:  
Systemplanung - Planung und Realisierung von Informatikprojekten, Bd. 1, 6. Aufl.  
München, Wien: Oldenbourg, 1994
- [Hepp 1999] Hepp, Erich; Lipinski, Marek:  
Rechnerische Simulation thixotroper Formgebungsprozesse, 1999  
2. Jahresfachtagung "Innenhochdruck- und Thixoformen von Stahl, Aluminium und Magnesium", 29./30. November 1999, Bad Nauheim, S. 1-9
- [Hermann, 1996] Hermann, Silke; Happel, Jürgen:  
Neue Notwendigkeiten für ein Umweltcontrolling  
In: controller magazin (1996), Nr. 1, S. 35-43
- [Holze 2001] Holze, Beate:  
Umweltkostenrechnung  
In: Baumast, A.; Pape, J. (Hrsg.), Umweltmanagement, 2001, S. 193-206
- [Horváth 1998] Horváth, Péter; Brokemper, Andreas:  
Strategieorientiertes Kostenmanagement - Thesen zum Einsatz von Kosteninformationen im strategischen Planungsprozeß  
In: ZfB 68 (1998), Nr. 6, S. 581-604
- [Hummel 2000] Hummel, Johannes:  
Strategisches Öko-Controlling - Konzeption und Umsetzung in der textilen Kette, 2. Aufl.  
Wiesbaden: Gabler, 2000; zugl. Diss., Univ. St. Gallen, 1997

- [Hydro 1997] Hydro Magnesium (Hrsg.):  
Magnesium in Automotive - An environmentally sound solution  
Hydro Magnesium, 1997 - Firmenschrift
- [Hydro 1999] Hydro Magnesium (Hrsg.):  
Magnesium Die Casting  
Hydro Magnesium, 1999 - Firmenschrift
- [ISO 14001, 1996] Norm DIN EN ISO 14001:  
Umweltmanagementsysteme - Spezifikation mit Anleitung zur Anwendung  
Berlin: Beuth, 1996
- [ISO 14040, 1997] Norm DIN EN ISO 14040:  
Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen  
Berlin: Beuth, 1997
- [ISO 14042, 2000] Norm DIN EN ISO 14042:  
Umweltmanagement - Ökobilanz - Wirkungsabschätzung  
Berlin: Beuth, 2000
- [Janzen 2001] Janzen, Henrik; Matten, Dirk:  
Module eines betrieblichen Umweltmanagementsystems  
In: Baumast, A.; Pape, J. (Hrsg.), Umweltmanagement, 2001, S. 51-68
- [Jülich 2001] Forschungszentrum Jülich GmbH:  
Neue Materialien für Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts - MaTech des  
Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) - Jahresbericht  
2000/2001  
Jülich: 2001 - Forschungsbericht
- [Jürgens 1999] Jürgens, Gunnar; von Steinaecker, Jürgen; Hecht, Stefan:  
Stoffstromanalysen - Grundlage des Umweltmanagements  
In: Umwelt, 29 (1999), Nr. 3, S. 30-31

- [Jürgens 2000] Jürgens, Gunnar:  
Implementierung eines betrieblichen Stoffstrommanagements  
In: Bullinger, H.-J., Eversheim, W., Haasis, H.-D., Klocke, F. (Hrsg.), Auftragsabwicklung optimieren nach Umwelt- und Kostenzielen, 2000, S.259-270
- [Kainer 2000] Kainer, K.U. (Hrsg.):  
Internationaler Kongreß "Magnesium Alloys and their Applications" der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e.V., München, 26-28. September 2000  
Weinheim: Wiley-VCH, 2000
- [Kanning 2001] Kanning, Helga; Müller, Martin:  
Bedeutung des Nachhaltigkeitsleitbildes (sustainable development) für das betriebliche Management  
In: Baumast, A.; Pape, J. (Hrsg.), Betriebliches Umweltmanagement - Theoretische Grundlagen, Praxisbeispiele, 2001, S. 13-27
- [Kensy 1993] Kensy, Petra:  
Ökobilanzen – Eine kritische Bestandsaufnahme  
CUTEC-Schriftenreihe Nr. 9  
Göttingen: Cuvillier, 1993; zugl. Dipl.-Arbeit, TU Clausthal, 1993
- [Kühnle 1995a] Kühnle, Hermann; Ahrend, Hans-Werner; Wagenhaus, Gerd:  
Planung umweltgerechter Fabriken mit Hilfe von Ökobilanzen  
In: Maschinenmarkt, 10 (1995), Nr. 21, S. 38-41
- [Kühnle 1995b] Kühnle, Hermann; Ahrend, Hans-Werner; Wagenhaus, Gerd:  
Ökobilanz in der Fabrikplanung als Beitrag zum Entwurf umweltgerechter Strukturen  
In: Maschinenmarkt, 10 (1995), Nr. 21, S. 56-58
- [Lange 1998] Lange, Christoph; Fischer, Regina:  
Umweltschutzbezogene Kostenrechnung auf Basis der Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung als Instrument des Controlling  
In: ZfB (1998), Nr. 1, Ergänzungsheft, S. 107-123

- [LeBeau 1998] LeBeau, S.E.; Yamamoto, Y.; Sakamoto, K.:  
Thixomolding of Magnesium Automotive Components  
Society of Automotive Engineers, Inc. - International Congress and Exposition,  
Detroit, MI, USA, 23-26. Februar 1998  
SAE Technical Paper Series No. 980087, 1998
- [Lehni 1998] Lehni, Markus:  
State of the play report - WBCSD project on eco-efficiency metrics & reporting  
World Business Council for Sustainable Development, 1998
- [Maag 2001] Maag, Joachim:  
Die Zukunft umweltfreundlicher gestalten – Moderne ERP-Systeme unterstützen die öko-effiziente Herstellung von Produkten  
In: FB/IE (2001), Nr. 4, S. 158-161
- [Mai 1994] Mai, M.:  
Die technologische Provokation: Beiträge zur Technikbewertung in Politik und  
Wirtschaft  
Berlin: Ed. Sigma, 1994
- [Männel 1991] Männel, Wolfgang:  
Kostenrechnung als Instrument der Unternehmensführung  
In: Scheer, August-Wilhelm (Hrsg.), Grenzplankostenrechnung, 1991, S. 13-31
- [Männel 1992] Männel, Wolfgang (Hrsg.):  
Handbuch Kostenrechnung  
Wiesbaden: Gabler, 1992
- [Männel 1995] Männel, Wolfgang:  
Ziele und Aufgabenfelder des Kostenmanagements  
In: Reichmann, Thomas (Hrsg.), Handbuch Kosten- und Erfolgs-Controlling,  
1995, S. 25-45
- [Meffert 1992] Meffert, Heribert; Kirchgeorg, Manfred:  
Marktorientiertes Umweltmanagement - Grundlagen und Fallstudien  
Stuttgart: Poeschel, 1992

- [Molthan 1992] Molthan, Volker:  
 Öko-Controlling: Ein Controller-Arbeitsfeld der Zukunft?  
 In: controller magazin (1992), Nr. 4, S. 215-217
- [Müller 2001] Müller, Martin:  
 Zertifizierbare Umweltmanagementsysteme  
 In: Baumast, A.; Pape, J. (Hrsg.), Umweltmanagement, 2001, S. 39-50
- [Müller-Christ 2001] Müller-Christ, Georg:  
 Umweltmanagement - Umweltschutz und nachhaltige Entwicklung  
 München: Vahlen, 2001
- [MUV 2001] Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (Hrsg.):  
 Umweltplan Baden-Württemberg - Beschluß des Ministerrats des Landes Baden-Württemberg vom 12.12.2000
- [Nagel 1999] Nagel, Carsten:  
 Umweltkennzahlen - ein Plädoyer für etwas Geduld  
 In: Umwelt, 29 (1999), Nr. 5/6, S. 25-26
- [Nagl 1993] Nagl, Gerhard C.:  
 Öko-Controlling - Ein Konzept zur organisatorischen und instrumentellen Verankerung der ökologischen Unternehmensführung  
 In: controller magazin (1993), Nr. 4, S. 212-214
- [Neukirchen 2001] Neukirchen, B.; Rommel, W.; Wiedemeier, J.; Wolfertz, R.; Wolff, H.:  
 Integrierte Umwelttechnik - am Beispiel der Gießereitechnik  
 In: Umwelt, (2001), Nr. 1/2, S. 28-32
- [Ordelheide 1991] Ordelheide, Dieter; Rudolph, Bernd; Büsselmann, Elke (Hrsg.)  
 Betriebswirtschaftslehre und ökonomische Theorie  
 Wissenschaftliche Jahrestagung des Verbandes der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e.V. (1990)  
 Stuttgart: Poeschel, 1991

- [Opierzynski 1999] Opierzynski, Ralf:  
Effizientes Ressourcenmanagement durch Umweltkennzahlen - Methodik zur Einführung eines EDV-gestützten Umweltkennzahlensystems in mittelständischen Unternehmen  
In: Umwelt, 29 (1999), Nr. 5/6, S. 27-29
- [Pape 2001] Pape, Jens; Pick, Erich; Goebels, Thomas:  
Umweltkennzahlen und -systeme zur Umweltleistungsbewertung  
In: Baumast, A.; Pape, J. (Hrsg.), Umweltmanagement, 2001, S. 178-192
- [Petmecky 1998] Petmecky, Alexander:  
Integrierte ökologisch-ökonomische Bilanzierung der Herstellung von Magnesiumbauteilen und Entwicklung einer Methode zur Übertragbarmachung von Bilanzierungsergebnissen  
Diplomarbeit, TU Clausthal, 1998, unveröffentlicht
- [Pick 2001] Pick, Erich; Faßbender-Wynands, Ellen; Seuring, Stefan:  
Die Methodik der Ökobilanzierung  
In: Baumast, A.; Pape, J. (Hrsg.), Umweltmanagement, 2001, S. 166-177
- [Poppe 2001] Poppe, Holger:  
Indikatoren gestützte Umweltbewertung zur Steuerung der Produktentwicklung in der Automobilindustrie  
Clausthal: Papierflieger Verlag, 2001; zugl. Diss., TU Clausthal, 2001
- [Rat 1998] Rat der Sachverständigen für Umweltfragen:  
Umweltgutachten 1998  
Stuttgart: Metzler-Poeschel, 1998
- [Reichmann 1995] Reichmann, Thomas (Hrsg.):  
Handbuch Kosten- und Erfolgs-Controlling  
München: Vahlen, 1995
- [Reime 1971] Reime, R.:  
Investitionsrechnung und Verfahrensvergleich im Maschinenbau besonders im Hinblick auf den Einsatz von NC-Maschinen  
In: Zwf 66 (1971), Nr. 7, S. 351-363

- [Reinhart 1999] Reinhart, G.; Mößmer, H.:  
Controlling bei Produktionsstrukturänderungen
- [Reiß 1992] Reiß, M.; Corsten, H.:  
In: Männel, Wolfgang (Hrsg.), Handbuch Kostenrechnung, 1992, S. 1471-1491
- [Rogler 2000] Rogler, Silvia:  
Industrielle Umweltkostenrechnung  
In: krp (2000), Nr. 3, S. 172-180
- [Rollberg 2001] Rollberg, Roland:  
Integrierte Unternehmensplanung  
Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2001; zugl. Habil.-Schr., TU Dresden, 2000
- [Roth 1992] Roth, Ursula:  
Umweltkostenrechnung - Grundlagen und Konzeption aus betriebswirtschaftlicher Sicht  
Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1992; zugl. Diss., Univ. Köln, 1991
- [Saito 1996] Saito, Ken:  
Thixomolding of Magnesium Alloys  
In: International Magnesium Association (IMA) (Hrsg.), The 53<sup>rd</sup> Annual World Magnesium Conference, 2.-4. Juni 1996, Ube, Japan, S. 30-37
- [Saur 1996a] Saur, K.:  
Kapitalbilanzen befruchten Ganzheitliche Bilanzierungen  
In: Eyerer, Peter (Hrsg.), Ganzheitliche Bilanzierung - Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen, 1996, S. 91-97
- [Saur 1996b] Saur, K.; Eyerer, P.:  
Bewertung zur Ganzheitlichen Bilanzierung  
In: Eyerer, Peter (Hrsg.), Ganzheitliche Bilanzierung - Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen, 1996, S. 210-266
- [Schaltegger 1992] Schaltegger, Stefan; Sturm, Andreas:  
Öko-Controlling als ökonomisch-ökologisches Führungsinstrument  
In: i/o Management Zeitschrift (1992), Nr. 6, S. 71-75

- [Schaltegger 1995] Schaltegger, Stefan; Sturm, Andreas:  
 Öko-Effizienz durch Öko-Controlling - zur praktischen Umsetzung von EMAS  
 und ISO 14.001  
 Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1995
- [Scheer 1991] Scheer, August-Wilhelm (Hrsg.):  
 Grenzplankostenrechnung: Stand und aktuelle Probleme; Hans Georg Plaut zum  
 70. Geburtstag, 2. Aufl.  
 Wiesbaden: Gabler, 1991
- [Schenk 2001] Schenk, Michael; Sallaba, Gregor; Gröpke, Steffen:  
 Variantenbewertung in der Fabrikplanung mit Hilfe der antizipativen Herstell-  
 kostenkalkulation  
 In: ZWF (2001), Nr. 4, S. 171-177
- [Schlatter 1988] Schlatter, Andreas; Züst, Rainer:  
 Aufbau betrieblicher Umweltinformationssysteme  
 In: Bullinger, H.-J., et al. (Hrsg.), Umweltinformationssysteme, 1998: S. 31-54
- [Schmidt 1995] Schmidt, Mario; Schorb, Achim (Hrsg.):  
 Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits  
 Berlin, u.a.: Springer, 1995
- [Scholl 1998] Scholl, Kai:  
 Konstruktionsbegleitende Kalkulation - computergestützte Anwendung von  
 Prozeßkostenrechnung und Kostentableaus  
 München: Vahlen, 1998 (Controlling Praxis); zugl. Diss., Uni Stuttgart, 1997
- [Schönheit 1997] Schönheit, Martin:  
 Wirtschaftliche Prozeßgestaltung - Entwicklung, Fertigung, Auftragsabwick-  
 lung  
 Berlin, u.a.: Springer, 1997
- [Schubert 2000] Schubert, Walter; Gjestland, Haavard:  
 In: Kainer, K.U. (Hrsg.), Magnesium Alloys and their Applications, 2000, S.  
 761-766

- [Schuh 1989] Schuh, Günther:  
Gestaltung und Bewertung von Produktvarianten - Ein Beitrag zur systematischen Planung von Serienprodukten  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989; zugl. Diss., RWTH Aachen, 1988
- [Schultz 1997] Schultz, Axel:  
Optimierung der Herstellung von Magnesiumbauteilen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit  
In: Europäische Forschungsgemeinschaft Magnesiumguss e.V. (Hrsg.),  
5. Magnesiumguss Abnehmerseminar & Automotive Seminar, 8./9. Okt. 1997  
Aalen: 1997 - Tagungsband
- [Schultz 1998a] Schultz, Axel; Holzbaur, Ulrich:  
Optimierung der Herstellung von Magnesiumbauteilen hinsichtlich Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit  
In: Gießerei-Praxis (1998), Nr. 2, S. 53-61
- [Schultz 1998b] Schultz, Axel:  
Integrierte Bilanzierung der Prozesse Druckguß und spanende Bearbeitung  
In: BMBF-Projekt MADICA - Sichere Produktionsprozesse für die Magnesiumver- und -bearbeitung (Hrsg.), 1. Plenumsitzung, 5./6. März 1998  
Aalen: 1998 - Tagungsband
- [Schultz 1999] Schultz, Axel:  
Ökobilanzierung  
In: BMBF-Projekt MADICA - Sichere Produktionsprozesse für die Magnesiumver- und -bearbeitung (Hrsg.), Abschlußpräsentation, Teilprojekt 2 - Verfahrensentwicklung Druckgießen, 1./2. Dezember 1999  
Aalen: 1999 - Tagungsband (zugl. Abschlußbericht), S. 81-83
- [Schwarz 1997] Schwarz, Erich; Steven, Marion; Lethmathe, Peter:  
Methoden der Umweltberichterstattung  
In: ZfB 67 (1997), Nr. 4; S. 471-494
- [Schweres 1999] Schweres, Manfred:  
Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung  
In: ZWF (1999), Nr. 9, S. 539-542

- [SFB 144, 1996] Sonderforschungsbereich 144 der DFG an der RWTH Aachen (Hrsg.):  
Abschlußkolloquium des SFB 144 - Energie und Rohstoffeinsparungen, Methoden für ausgewählte Fertigungsprozesse  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996
- [Spengler 1998] Spengler, Thomas:  
Industrielles Stoffstrommanagement - Betriebswirtschaftliche Planung und Steuerung von Stoff- und Energieströmen in Produktionsunternehmen  
Technological economics, Bd. 54  
Berlin: Erich Schmidt, 1998; zugl. Habil.-Schr., Univ. Karlsruhe, 1998
- [Spengler 2001] Spengler, Thomas; Schröter, Marcus:  
Einsatz von Operations Research im produktbezogenen Umweltschutz – Stand und Perspektiven  
In: BFuP, (2001), Nr. 3, S. 227-244
- [Stahl 1999] Stahl, Beate:  
Methodenvergleich und Methodenentwicklung zur Lösung der Bewertungsproblematik in produktbezogenen Ökobilanzen  
Frankfurt a. M.: Digitaler Vervielfältigungs- und Verlagsservice (DVS), 1999; zugl. Diss., Univ. Bremen, 1998
- [Steger 1993] Steger, Ulrich:  
Umweltmanagement - Erfahrungen und Instrumente einer umweltorientierten Unternehmensstrategie, 2. Aufl.  
Wiesbaden: Gabler, 1993
- [TA Esslingen 2001] Technische Akademie Esslingen, Ostfildern-Nellingen (Hrsg.):  
Thixoforming  
Tagung Thixoforming, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern-Nellingen, 26./27. April 2001,  
Esslingen: 2001 - Tagungsschrift
- [Trittin 1999] Trittin, Jürgen:  
Ökologie ist Langzeitökonomie - Rede von Bundesumweltminister Jürgen Trittin anlässlich der Verleihung des IBM-Umweltpreises 1999  
In: Umwelt (1999), Nr. 12, S. 565-568

- [UBA 1992] Umweltbundesamt (Hrsg.):  
Ökobilanzen für Produkte - Bedeutung, Sachstand, Perspektiven  
Berlin: UBA-Texte 38/92, 1992
- [UBA 1995] Umweltbundesamt (Hrsg.):  
Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung  
Berlin: UBA-Texte 23/95, 1995
- [UBA 1999] Umweltbundesamt:  
Betriebliche Umweltauswirkungen besser erfassen und bewerten  
In: Umwelt (1999), Nr. 5, S. 213-215
- [VDI 1999] VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.):  
VDI-Bericht 1505 - Technologien um das 3-Liter-Auto,  
Tagung Braunschweig, 16.-18. November 1999  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999
- [VDI 2000] Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.):  
Professional Congress Environment, Climate, Health  
World Engineers´ Convention, EXPO 2000 Hannover, 19.-21. Juni 2000  
Düsseldorf: VDI-Verlag, 2000
- [VDI 2235, 1987] VDI-Richtlinie 2235:  
Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren  
Berlin: Beuth, 1987
- [VDI 4600, 1987] VDI-Richtlinie 4600 (Entwurf):  
Kumulierter Energieaufwand, Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden  
Berlin: Beuth, 1995
- [VDMA 1983] VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (Hrsg.):  
Das Rechnen mit Maschinenstundensätzen  
Betriebswirtschaftliche Schriftenreihe Band 7  
Frankfurt/Main: Maschinenbau-Verlag GmbH, 1983
- [VW 1995] Volkswagen AG (Hrsg.):  
Der Umweltbericht von Volkswagen, 1995 - Firmenschrift

- [VW 1997] Volkswagen AG (Hrsg.):  
Der Umweltbericht von Volkswagen, 1997 - Firmenschrift
- [VW 1999a] Volkswagen AG (Hrsg.):  
Umweltbericht 1999/2000, 1999 - Firmenschrift
- [VW 1999b] Volkswagen AG (Hrsg.):  
Schlußbericht "MADICA - Sichere Produktionsprozesse für die Magnesiumver-  
und -bearbeitung", Teilprojekt 2 "Druckguß", Förderkennzeichen: 02PV13198,  
1999
- [VW 2001] Volkswagen AG (Hrsg.):  
Umweltbericht 2001/2002 - Mobilität und Nachhaltigkeit, 2001- Firmenschrift
- [Warnecke 1993a] Warnecke, Hans-Jürgen:  
Der Produktionsbetrieb 1 - Organisation, Produkt, Planung, 2. Aufl.  
Berlin, u.a.: Springer, 1993
- [Warnecke 1993b] Warnecke, H.-J. et al.:  
Kostenrechnung für Ingenieure, 4. Aufl.  
München, u.a.: Hanser Verlag, 1993
- [Warnecke 1996] Warnecke, H.-J. et al.:  
Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure, 3. Aufl.  
München, u.a.: Hanser Verlag, 1996
- [Warnecke 1998] Warnecke, Hans-Jürgen; Westkämper, Engelbert:  
Einführung in die Fertigungstechnik, 3. Aufl.  
Stuttgart: Teubner, 1998
- [Westkämper 1999] Westkämper, Engelbert; Friedel, Andreas; Culha, Berkun:  
Umweltkennzahlen zielsicher eingeführt  
In: ZWF 93 (1998), Nr. 3, S. 97-100

- [Witt 1986] Witt, Frank-Jürgen:  
Der Maschinenstundensatz - ein fertigungswirtschaftliches Dispositionsinstrument?  
In: FB/IE 35 (1986), Nr. 3, S. 130-133
- [Wöhe 1986] Wöhe, Günther:  
Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 16. Aufl.  
München, Vahlen, 1986
- [Zahn 1996] Zahn, E.; Schmid, U.; Seebach, A.:  
Zusammenspiel von Ökologie und Ökonomie  
In: Eyerer, Peter (Hrsg.), Ganzheitliche Bilanzierung - Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen, 1996, S. 65-90
- [Zangemeister 1976] Zangemeister, Christof:  
Nutzwertanalyse in der Systemtechnik - Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen, 4. Aufl.  
München: Wittmannsche Buchhandlung, 1976

## LEBENS LAUF

### Persönliche Daten

Name Axel Schultz  
Geburtsdatum/-ort 29.11.1968 in Iserlohn  
Familienstand ledig  
Staatsangehörigkeit deutsch

### Schulbildung

1975 - 1979 Grundschule in Plochingen  
1979 - 1988 Gymnasium in Plochingen und in Künzelsau; Allgemeine Hochschulreife

### Bundeswehr

10/1988 - 09/1990 Soldat auf Zeit: Reserveoffizierslaufbahn; Leutnant d.R.

### Studium

10/1990 - 09/1992 Universität Dortmund: Grundstudium Maschinenbau; Vordiplom  
10/1992 - 09/1996 Universität Stuttgart: Hauptstudium Maschinenbau; Diplom-Ingenieur  
Vertiefungsrichtungen: Fabrikbetrieb, Werkzeugmaschinen  
09/1994 - 12/1995 University of Wisconsin-Madison, Madison, USA:  
Studium Manufacturing Systems Engineering; Master of Science  
Stipendium des DAAD

### Berufstätigkeit

seit 09/1996 Volkswagen AG, Wolfsburg  
09/1996 - 09/1999 Konzern-Produktionsplanung und Versuchsbau Vorentwicklung: Doktorand  
U.a. BMBF-Projekt MADICA "Sichere Produktionsprozesse für die Magnesiumver- und -bearbeitung" (interne Koordination, Ökobilanzen, Magnesiumspritzgießen).  
09/1999 - 02/2001 Versuchsbau Vorentwicklung: Technischer Sachbearbeiter  
U.a. Benchmarking der Prozeßkette Prototypen und BMBF-Projekt "Werkstoff- und Verfahrenstechnik für das Metallspritzgießen von neuen kriechbeständigen Magnesiumlegierungen (MATALEND)".  
02/2001 – 09/2002 Versuchsbau: Assistent des Bereichsleiters  
U.a. Projektcontrolling, Versuchsbau-Ziele-Prozeß, Projekt zur Verbesserung der Serienanlaufreife, Benchmarking.  
seit 10/2002 Versuchsbau: Leitung der Unterabteilung Budget-Kaplan-Auftragsannahme