

Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg

Erkenntnisse – Erfahrungen - praktische Erfolge

Endbericht des BMBF-Projektes

Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg

Martin Brahmer-Lohss, Hans-J. Dräger, Arnim von Gleich, Stefan Gößling-Reisemann,
Manuel Gottschick, Dieter Grossmann, Helmut Horn, Dirk Jepsen,
Silke Kracht, Joachim Lohse, Sascha Lorenzen, Knut Sander

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkung	7
2	Einleitung	8
3	Nachhaltigkeit als Ziel und Nachhaltigkeitsbewertung	12
3.1	Nachhaltigkeit als Ziel.....	12
3.2	Nachhaltigkeitskriterien.....	14
3.2.1	<i>Zielorientierte Nachhaltigkeitskriterien</i>	18
3.2.2	<i>Tragekapazitätsorientierte Kriterien</i>	19
3.2.3	<i>Wirkungsmodellorientierte Kriterien</i>	20
3.2.4	<i>Vorsorgeorientierte Kriterien</i>	20
3.3	Nachhaltigkeitsbewertung.....	22
3.3.1	<i>Möglichkeiten und Grenzen der Ökobilanz</i>	23
3.3.2	<i>Entropiebilanzen als Ergänzung zur Ökobilanz</i>	24
3.3.3	<i>Entropische Effizienz und Ökologische Amortisierung</i>	27
3.4	Die Zielperspektive einer Nachhaltigen Metallwirtschaft	31
4	Nachhaltigkeitsstrategien	33
4.1	Möglichkeiten und Grenzen des Stoffstrommanagements	36
4.1.1	<i>Zwei praktische Beispiele</i>	37
4.1.1.1	Hochwertige Schleifschlammverwertung	37
4.1.1.2	Minimalmengenschmierung.....	37
4.2	Effizienzstrategie und Stoffstrommanagement	38
4.3	Konsistenzstrategie und Industrial Ecology	41
4.4	Grenzen des regionalen Stoffstrommanagements und der regionalen Verknüpfung von Stoffströmen	43
4.4.1	<i>Beispiel: Hochwertige Strahlmittelverwertung</i>	43
4.5	Perspektivwechsel bei der Betrachtung von Stoffen und Stoffströmen	44
4.5.1	<i>Grenzen der quantitativen Durchflussbetrachtungen</i>	44
4.5.2	<i>Verbrauch als Qualitätsverlust</i>	45
4.5.3	<i>Gefahrstoffe, Schadstoffe, ‚Rio‘-Stoffe und Störstoffe</i>	45
4.6	Stoffstrommodelle als Informationsgrundlage von Nachhaltigkeitsstrategien.....	47
4.6.1	<i>Zur Rolle von Stoffstrommodellen in der Kommunikation über Langfristprobleme- Das Beispiel Kupfer als Störstoff im Stahlkreislauf</i>	49
5	Nachhaltigkeitsstrategien im Praxistest	51
5.1	Nachhaltigkeitsdefizite der Metallwirtschaft in Hamburg und darüber hinaus.....	51
5.2	Die Innovationsstrategie - Wettbewerbsfähigkeit durch Nachhaltigkeitsorientierung	54
5.3	Die Region als Handlungsraum	56
5.3.1	<i>Innovationsfähigkeit in regionalen Innovationssystemen</i>	57
5.3.2	<i>Die Wirtschaftsregion Hamburg</i>	59
5.3.3	<i>Die Hamburger Metallwirtschaft</i>	59
5.3.4	<i>Vernetzungserfolge</i>	61
5.4	Erfolgsbedingungen für Kooperationen mit Unternehmen in Nachhaltigkeitsprojekten.....	64

5.4.1	<i>Zentrale Probleme in der Herangehensweise</i>	65
5.4.2	<i>Konkrete Ansatzpunkte und Motivlagen</i>	66
5.4.3	<i>Zugang zu strategisch relevanten Abteilungen bzw. Funktionsbereichen</i>	69
5.4.4	<i>Zwischenfazit</i>	71
6	Metalle als Werkstoff und Ressource	72
6.1	Faszination und Nutzen der Metalle	72
6.2	Stoffströme - Entwicklungstendenzen der Herstellung und Verwendung von Metallen	74
6.3	Metalle als ‚nicht-regenerative‘ Ressource	81
6.3.1	<i>Erze und Metalle als ‚Erbe der Menschheit‘</i>	82
6.3.2	<i>Zur Reichweite von Reserven und Ressourcen</i>	85
6.4	Metallrecycling als ‚Lösung‘?	90
6.5	Die Vermeidung dissipativer Verluste- Eine Strategie mit ‚doppelter Dividende‘. 99	
7	Entropiebilanz der Kupferherstellung aus Roherzkonzentraten und Sekundärmaterialien - Ressourcenverbrauch eines metallurgischen Prozesses	101
7.1	Einleitung	101
7.2	Zur Methode	101
7.3	Untersuchte Prozesse der Primärkupfererzeugung	103
7.3.1	<i>Beispiel-Prozess: der Schwebeschmelzofen</i>	104
7.3.2	<i>Beispiel-Stoffstrom: Kupfererzkonzentrat</i>	105
7.3.3	<i>Wärmeverluste</i>	106
7.3.4	<i>Die anderen Prozesse</i>	107
7.4	Entropiebilanz des Gesamtprozesses	109
7.5	Sekundärkupferproduktion	110
7.5.1	<i>Recycling von reinen Kupferabfällen im Anodenofen</i>	110
7.5.2	<i>Recycling von PVC-haltigem Kupferschrott im Anodenofen</i>	111
7.5.3	<i>Recycling von SiO₂- und PVC-haltigem Kupferschrott im Anodenofen</i>	112
7.6	Diskussion der Ergebnisse	113
7.6.1	<i>Diskussion der Ergebnisse für die Primärproduktion</i>	113
7.6.2	<i>Diskussion der Recycling-Ergebnisse</i>	114
7.7	Abschließende Bemerkung	115
8	Nachhaltiger Stahlkreislauf - Die Rolle des Kupfers als Störellement	116
8.1	Hintergrund	116
8.2	Kupfer im Auto	120
8.3	Situation und technische Handlungsoptionen im Akteursnetz "Auto"	123
8.3.1	<i>Produktionsebene / Automobilhersteller</i>	123
8.3.2	<i>Separationsschritte</i>	123
8.3.3	<i>Stahlwerk</i>	125
8.3.3.1	ISPAT Hamburger Stahlwerke GmbH	125
8.3.3.2	Georgsmarienhütte GmbH	130
8.4	Zwischenfazit	134
8.5	Einflussfaktoren im Handlungsfeld	134
8.5.1	<i>Automobilhersteller</i>	134

8.5.2	<i>Demontage</i>	136
8.5.3	<i>Shredder</i>	138
8.5.4	<i>Schrotthandel</i>	140
8.6	Akteursübergreifende Kommunikation.....	141
8.6.1	<i>Regionale Situation</i>	141
8.6.2	<i>Akteursübergreifende Kommunikation</i>	142
8.6.3	<i>Kommunikationsinstrumente</i>	143
8.6.3.1	Verändertes Leitbild.....	143
8.6.3.2	Stahlmodell	143
8.6.3.3	Simulation	144
8.7	Akteursworkshop	147
8.8	Schlussfolgerungen	148
9	Verwertungsmöglichkeit von Strahlmittelabfällen als Rohstoff für Sinterstähle	150
9.1	Ausgangslage	150
9.1.1	<i>Herstellung von Sinterstählen</i>	150
9.1.2	<i>Pulverherstellung</i>	151
9.1.3	<i>Mengenaufkommen von Strahlmittelabfälle in der BRD</i>	151
9.2	Strahlmittelabfälle bei Jungheinrich	152
9.2.1	<i>Strahlmittel</i>	152
9.2.2	<i>Gestahlte Werkstoffe</i>	152
9.2.3	<i>Beschaffenheit der Strahlmittelabfälle</i>	152
9.2.4	<i>Einsatzmöglichkeit als Rohstoff für Sinterstähle</i>	153
9.2.5	<i>Einschränkungen</i>	154
10	Schleifschlammrecycling	156
10.1	Ausgangslage	156
10.2	Vorgehen	157
10.2.1	<i>Kupolofen</i>	157
10.2.2	<i>Zementofen</i>	159
10.2.3	<i>Modell und Bilanzgrenzen</i>	160
10.2.4	<i>Ergebnisse</i>	161
10.2.5	<i>Bewertungssystem</i>	164
10.3	Sinterverfahren der Firma Oesterreich	166
10.3.1	<i>Modellierung</i>	166
10.3.2	<i>Ergebnisse</i>	169
11	Optimierte Kühlschmierung bei der spanenden Metallbearbeitung - Ansätze auf der Prozessebene	171
11.1	Ausgangslage	171
11.2	Ziele des Teilprojektes.....	172
11.3	Zum Vorgehen	173
11.3.1	<i>Erstversuch und direkte Kooperationsanbahnung</i>	173
11.3.2	<i>Einbindung von Technologie-Promotoren</i>	174
11.4	Minimalmengen Kühlschmierung in der Praxis	174
11.4.1	<i>Ausgangslage</i>	175
11.4.2	<i>Ausrüstung und Einstellungen</i>	175
11.4.3	<i>Erfahrungen aus der Bearbeitung</i>	177

11.4.4	<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	180
11.4.5	<i>Gemischte „Vor-Ort“ Erfolge</i>	181
11.5	Ergebnisse	182
12	Betriebliches Materialflusscontrolling - Fakten und Kennzahlen als Basis für die innerbetriebliche Nachhaltigkeitsdiskussion	184
12.1	Kontext zum Gesamtvorhaben	184
12.2	Betriebliche Beispiele	184
12.3	Bewertung der Situation	186
12.4	Konzept-Entwicklung	187
12.4.1	<i>Bestehende Lösungsansätze</i>	187
12.4.2	<i>Anforderungen</i>	188
12.4.3	<i>Prototypisches EDV-Werkzeug</i>	188
12.4.4	<i>Anwendungserfahrungen</i>	192
12.5	Ergebnisse und Perspektiven	192
13	Produktgestaltungs- und Produktnutzungsstrategien - anspruchsvolle win-win-Beispiele des Stoffstrommanagements	194
13.1	Einführung in das Thema	194
13.1.1	<i>Produktnutzungsstrategien</i>	196
13.1.2	<i>Potenziale und Grenzen öko-effizienter Dienstleistungen</i>	199
13.1.2.1	<i>Zwischenfazit</i>	201
13.2	Nachhaltigkeitsorientierte Produktgestaltung	202
13.2.1	<i>Kreislauforientierte Produktgestaltung als Bestandteil nachhaltigkeitsorientierter Ansätze für Unternehmen</i>	202
13.2.2	<i>Unternehmenszugang im Bereich der Produktgestaltung</i>	204
13.2.3	<i>Ansatz der Konstruktion</i>	205
13.2.4	<i>Der Konstruktionsprozess</i>	205
13.2.5	<i>Modularisierung – eine win-(win)-win-Strategie für produzierende Unternehmen?</i>	208
13.2.5.1	<i>Drei verschiedene Ansätze der Modularisierung</i>	208
13.2.6	<i>Praxiszugänge</i>	209
13.2.7	<i>Unternehmenszugänge</i>	210
Unternehmen Jungheinrich	210
Unternehmen Greggersen	211
Unternehmen Tipper Tie	212
13.2.7.1	<i>Unternehmen Tuchenhagen</i>	212
13.2.7.2	<i>Praktische Umsetzung im Unternehmen Tuchenhagen Modularisierung der Produktgestalt – Schritte zu einem Kreislaufkonzept</i>	213
13.2.7.3	<i>Varivent-Ventil der Fima Tuchenhagen</i>	214
13.2.8	<i>Bewertung und Ausblick</i>	222
13.3	Energiebilanz Flottenmanagement – ein Beispiel aus dem Bereich Produktnutzung:	223
13.3.1	<i>Beschreibung des Flottenmanagements eines Flurförderzeugherstellers</i>	224
13.3.2	<i>Betrieb einer Fahrzeugflotte in Verantwortung des Kunden (Referenzmodell)</i>	225
13.3.3	<i>Effizienzverbesserungen von Fahrzeugen, Batterien und Ladesystemen</i>	227
13.3.4	<i>Datengrundlage</i>	229
13.3.4.1	<i>Datengenauigkeit</i>	229
13.3.5	<i>Referenzmodell:</i>	230

13.3.6	<i>Methodik und Vorgehen</i>	231
13.3.6.1	Bilanzgrenzen	231
13.3.6.2	Bilanzierungsmethode	232
13.3.7	<i>Energiebilanzen</i>	233
13.3.7.1	Energieeinsparung im Betrieb durch Effizienzverbesserung der Fahrzeuge vs. Energieaufwand der Fahrzeugherstellung (regelmäßiger Fahrzeugaustausch im Rental)	233
13.3.7.2	Energieeinsparung durch Logistiko Optimierung vs. Energieaufwand der Fahrzeugherstellung (einmaliger Fahrzeugaustausch nach Flottenmaterialflussanalyse).....	235
13.3.7.3	Energieeinsparung durch Verwendung effizienter Batterie- und Ladetechnik in alte Fahrzeuge (Effizienzverbesserung ohne Fahrzeugaustausch).....	236
13.3.8	<i>Diskussion der Ergebnisse / Zusammenfassung und Bewertung</i>	236
13.3.9	<i>Interpretation und Umsetzungsmöglichkeiten</i>	238
13.3.9.1	Erreichtes ökologisches Einsparpotenzial Bewertung Rental vs. Kauf	238
13.3.9.2	Exkurs: Kostenanalyse	240
13.3.9.3	Umsetzungsmöglichkeiten / Potenziale.....	240
13.3.10	<i>Ausblick</i>	240
13.4	Der Gebrauchtmassenmaschinenmarkt im Maschinenbau.....	241
13.4.1	<i>Einleitung</i>	241
13.4.2	<i>Der Gebrauchtmassenmaschinenmarkt</i>	245
13.4.3	<i>Vorgehen bei der Auswertung</i>	246
13.4.3.1	Auswertung der Daten	248
13.4.4	<i>Fazit zur Analyse des Gebrauchtmassenmaschinenmarkts</i>	248
13.5	Zusammenfassung und Ausblick zu Produktgestaltungs- und Produktnutzungsstrategien	249
14	Fazit	252
14.1	Projektdesign	252
14.2	Projektergebnisse	252
14.3	Ausblick	255
15	Literatur	256
16	Abbildungsverzeichnis	270
17	Tabellenverzeichnis	273

1 Vorbemerkung

Das Projekt ‚Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg‘ (Kurztitel: ‚Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg‘) wurde durchgeführt im Rahmen der BMBF-Förderinitiative ‚Modellprojekte für Regionales Nachhaltiges Wirtschaften‘¹. Wissenschaftliche Modellprojekte haben eher explorativen Charakter, d. h. sie können in der Regel (noch) nicht im Rahmen eines etablierten wissenschaftlichen Paradigmas bearbeitet werden. Bei Projekten, die am Ziel der Nachhaltigkeit orientiert sind, müssen zudem Zugänge aus den verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen miteinander verknüpft werden. Wissenschaftliche Modellprojekte sind also gezwungen und haben die Chance, sich die Gegenstandseingrenzungen, die zentralen Fragestellungen und die grundlegenden Herangehensweisen (Modelle und Methoden) selbst zu erarbeiten. Das Ziel sind auch nicht überwiegend distanzierte wissenschaftliche Erkenntnisse. Die Herangehensweise ist vielmehr stark problem- und lösungsorientiert, d.h. diese Modellprojekte konzentrieren sich auf Nachhaltigkeitsdefizite und auf praktische Ansätze zu deren Verminderung. Sie konzentrieren sich auf die Akteure im Untersuchungsfeld, auf ihre Ziele, Motive, Handlungsmöglichkeiten und –restriktionen.

Zu den Erfolgskriterien dieser Art von ‚Praxisforschung‘ gehören somit neben den klassischen innerwissenschaftlichen Kriterien wie Verallgemeinerbarkeit, Objektivität², Erklärungspotential und Fruchtbarkeit der Erkenntnisse auch Beiträge zur Problemlösung sowie nach Möglichkeit ‚praktische Erfolge‘, d. h. konkrete Schritte in Richtung Nachhaltiges Wirtschaften. Zu den Zielen gehören somit auch Veränderungen des ‚Gegenstands‘.

Derzeit wird mit Blick auf den nötigen und möglichen Beitrag von Wissenschaft bzw. Wissenschaftlern zu Nachhaltigkeitsstrategien viel über eine dafür erforderliche ‚Transdisziplinarität‘ sowie über ‚Praxisforschung‘ diskutiert. Es wird vermutet, dass wir es hier mit einer sich entwickelnden ‚neuen Form‘ von Wissenschaft zu tun haben³. Das ist durchaus möglich. Die Orientierung auf Problemlösungen ist allerdings für die seit langem existierende anwendungsorientierte Forschung nichts Ungewöhnliches, wie schon ein kurzer Blick in die Ingenieurwissenschaften oder in die medizinische Forschung zeigt. Neu ist hingegen die Komplexität der Zielperspektive. Ein wesentlicher Unterschied könnte somit darin bestehen, dass die in den Ingenieurwissenschaften dominierende Orientierung auf ‚technische Realisierbarkeit‘ oder die normative Orientierung auf ‚Heilung bzw. Gesundheit‘ in der Medizin in diesen Disziplinen eine nicht mehr zu diskutierende Selbstverständlichkeit erreicht hat. Dies gilt trotz der weit verbreiteten Akzeptiertheit des Zieles einer nachhaltigen Entwicklung für die Nachhaltigkeitsforschung anscheinend noch lange nicht. Hier existiert offensichtlich noch ein erheblicher Klärungs- und Begründungsbedarf.

¹ Vgl. zur BMBF-Förderinitiative www.nachhaltig.org. Weitergehende Informationen zum Projekt finden sich auf www.nachhaltige-metallwirtschaft.de

² Die ja wiederum unterschiedlich weit reichend sein kann, angefangen von der Nachvollziehbarkeit einer Argumentation über die intersubjektive Überprüfbarkeit von Daten und Fakten bis hin zur beliebigen Wiederholbarkeit von Experimenten.

³ Vgl. Funtowicz 2001; Becker, Jahn 2002; Nowotny, Scott, Gibbons 2001

2 Einleitung

Das Projekt ‚Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg‘ (Kurztitel: ‚Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg‘) wurde durchgeführt im Rahmen der BMBF-Förderinitiative ‚Modellprojekte für regionales nachhaltiges Wirtschaften‘. Konstitutiv für das Projekt waren drei Grundansätze. Erstens der Charakter eines Modellprojektes, das nicht nur auf wissenschaftliche Erkenntnisse, sondern auch auf praktische Erfolge ausgerichtet ist. Zweitens die Konzentration auf Metallstoffströme (einschließlich einiger ihrer Begleit- und Nebenstoffströme). Hier sollten die Möglichkeiten eines Stoffstrommanagements ausgelotet werden. Und drittens die Orientierung am langfristigen Ziel eines ‚Nachhaltigen Wirtschaftens‘ mit dem Fokus auf Kooperationen zwischen den Akteuren der Hamburger Metallwirtschaft. Hier sollten die Möglichkeiten zur Verbesserung der Innovationsfähigkeit regionaler Innovationssysteme auf der Basis räumlicher Nähe ausgelotet werden.

Das Projekt hatte somit einen eher explorativen Charakter. D. h. die Nachhaltigkeitsdefizite der regionalen und globalen Metallwirtschaft, die Zielperspektive einer ‚Nachhaltigen Metallwirtschaft‘ und die an diesem Ziel orientierten Lösungsstrategien konnten nicht im Rahmen eines etablierten wissenschaftlichen Paradigmas erarbeitet werden. Die Gegenstandseingrenzungen, die zentralen Fragestellungen und die grundlegenden Herangehensweisen (Modelle und Methoden) galt es weitgehend selbst zu erarbeiten. Die Herangehensweise war problem- und lösungsorientiert, d. h. das Projekt konzentrierte sich auf die Nachhaltigkeitsdefizite im Bereich der regionalen und internationalen Metallwirtschaft. Zu den größten Herausforderungen gehört diesbezüglich ohne Zweifel ein nachhaltiger(er) Umgang mit der nicht-regenerativen Ressource Metalle. Dabei spielen die Probleme, die Möglichkeiten und Grenzen des Metallrecyclings eine zentrale Rolle, diese wurden exemplarisch am Beispiel der Verunreinigung des Stahlkreislaufs durch das Störelement Kupfer bearbeitet. Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Verbesserung der Ressourceneffizienz durch Verlängerung der Produktnutzung (inklusive Gebrauchtmaschinen- und Komponentenrecycling), durch veränderte Nutzungsstrategien (Leasing) und durch nachhaltigkeitsorientierte Produktgestaltung (recyclinggerechtes Konstruieren, Modulbauweise). Neben dieser Langfristproblematik wurden auch eher kurz- und mittelfristige Probleme angegangen, z. B. die Verbesserung des betrieblichen und vor allem überbetrieblichen Stoffstrommanagements durch Integration in ein entsprechendes softwaregestütztes Nachhaltigkeits-Controlling, die Verbesserung bzw. Optimierung der Schleifschlammverwertung sowie des Recyclings metallischer Strahlmittel und nicht zuletzt die drastische Verminderung des Einsatzes von Kühlschmierstoffen durch Einführung der Minimalmengenschmierung.

Diese Ziele galt es in Kooperation mit den Akteuren der Hamburger Metallwirtschaft zu erreichen. Dafür musste das Ziel eines Nachhaltigen Wirtschaftens operationalisiert, bearbeitbare Nachhaltigkeitsdefizite mussten identifiziert und nicht zuletzt mussten in Kooperation mit Unternehmen realisierbare Nachhaltigkeitsstrategien entwickelt und erprobt werden. Die Zielperspektive eines Nachhaltigen Wirtschaftens ist den Unternehmen der Metallwirtschaft in der Region Hamburg nicht fremd. Die meisten wirtschaftlichen Akteure kennen den Begriff der Nachhaltigkeit, auch wenn recht viele ihn noch vorwiegend mit Umweltschutz gleichsetzen. Im Alltagsgeschäft kommt die Thematik allerdings meist nur am Rande zur Sprache. Auch Kooperationen sind nicht ungewöhnlich, sowohl mit wissenschaftlichen Partnern als auch mit Unternehmen in der Region. Derartige Kooperationen sind eingespielt, dort wo es um konkrete Probleme und Vorhaben im Alltagsgeschäft geht. Kooperationen für so ‚große Themen‘ und ‚abstrakte Anliegen‘ wie ‚Nachhaltiges Wirtschaften‘ sind dagegen weit weniger selbstverständlich. Sie mussten sich ihren Platz erst ‚erarbeiten‘.

Auch das Verständnis von Region und Regionalisierung musste geklärt werden. Bei Projektbeginn war noch offen, inwieweit sich die Regionalorientierung sowohl auf die Akteursbeziehungen als auch auf die Stoffströme bezieht. Erst im Laufe des Projektes wurde

immer deutlicher, dass die räumliche Nähe für die Akteursbeziehungen von entscheidender strategischer Bedeutung ist. So hat sich im Verlauf des Projekts eine Schwerpunktsverschiebung durchgesetzt vom Versuch eines ‚regionalen Stoffstrommanagements‘ zum Versuch eines ‚regionalen Innovationsmanagements‘. Im ursprünglichen Projektdesign sollten die Stoffströme zwischen den verschiedenen Wirtschaftsakteuren noch stärker die Basis für überbetriebliche Kooperationen abgeben, sozusagen als ‚hartes Bindeglied‘ für Transaktion und Kooperation in der Wirtschaftsregion. „Kreislauf-Störungen“ in diesen Stoffströmen schienen sich als natürliche Kristallisationspunkte für den überbetrieblichen Nachhaltigkeitsdiskurs anzubieten. Vor dem Hintergrund der prinzipiell hohen Kreislaufraten und der positiven Marktpreise für Altmetalle sollten win-win-Lösungen gefunden werden hinsichtlich der Langfrist-Ziele Ressourcenschonung und Umweltentlastung einerseits und durchaus auch kurzfristiger ökonomischer Eigeninteressen andererseits. Diese Grundannahmen erwiesen sich in der Projektpraxis nur teilweise als tragfähig.

Stattdessen schoben sich immer mehr Ansätze zur Verbesserung der Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit von Unternehmensclustern der Hamburger Metallwirtschaft ins Zentrum, einschließlich der Möglichkeiten dieser regionalen Unternehmenscluster zur Wahrnehmung ihrer sozialen und ökologischen Verantwortung. Daraus folgte notwendigerweise eine immer stärker werdende Konzentration auf die Akteure im regionalen Untersuchungs- und Kooperationsraum, auf ihre Ziele, Motive, Handlungsmöglichkeiten und –restriktionen. Ins Zentrum gerieten somit die Fähigkeiten der regionalen Unternehmenscluster zum Umbau in Richtung Nachhaltigkeit, geleitet von der These, dass die in der Wirtschaftsregion Hamburg gegebene räumliche Nähe, die damit verbundenen Möglichkeiten zur direkten Kommunikation und damit zum Aufbau von vertrauensbasierten Beziehungen, gute Voraussetzungen bietet für die Optimierung der regionalen Innovationssysteme.

Der Ansatz des Projektes konzentrierte sich also weniger auf ‚regionale Stoffstromanalysen und regionales Stoffstrommanagement‘. Zum Teil ging es zwar auch um die regionalen Stoffströme bzw. um die Regionalisierung von Stoffströmen. In drei Teilprojekten wurden vorwiegend regionale Stoffströme untersucht und Ansätze für eine nachhaltigkeitsorientierte Optimierung entwickelt: Bei der Verwertung von Strahlmittelabfällen, bei der Verwertung von Schleifschlamm und bei der Reduzierung des Einsatzes von Kühlschmierstoffen. Im Zentrum des regionalen Ansatzes standen allerdings nicht die Stoffströme, sondern die handelnden Menschen und damit die Akteurskonstellationen in den regionalen Innovationssystemen der Metallwirtschaft. Die räumliche Nähe der Akteure zueinander wurde dabei als Basis für Unternehmenskooperationen betrachtet, bzw. weit darüber hinaus als Basis für die Fähigkeit von Unternehmen bzw. Unternehmensclustern zur Aufrechterhaltung und Steigerung ihrer Innovationsfähigkeit, als wesentliche Voraussetzung für internationale Wettbewerbsfähigkeit und zugleich für erfolgreiche Schritte in Richtung Nachhaltiges Wirtschaften.

Die Innovationsfähigkeit von Unternehmensclustern wird maßgeblich bestimmt durch die Fähigkeit einer großen Anzahl verschiedenster Akteure zum erfolgreichen Zusammenwirken in so genannten Innovationssystemen. Aufbauend auf den Arbeiten von Porter, denen zufolge der Weltmarkterfolg von Unternehmen in der Regel ‚homebased‘ ist, also auf einem gut funktionierenden ‚regionalen Innovationssystem‘ aufbaut⁴, standen die regionalen Akteursbeziehungen, die ‚regionalen Innovationssysteme‘ der Hamburger Metallwirtschaft im Zentrum der Betrachtung. ‚Räumliche Nähe‘, so eine der forschungsleitenden Thesen, kann eine wichtige Voraussetzung sein für erfolgreiche Innovationssysteme, aber sie ist bei weitem nicht hinreichend. Entscheidend ist ob und wie diese Gegebenheiten genutzt werden. Räumliche Nähe ist wichtig als Basis für direkte (face to face) Kommunikation. Über diese kann Vertrauen aufgebaut werden. Und Vertrauen ist wiederum eine wichtige Voraussetzung zur Senkung von Transaktionskosten. Wobei diese Transaktionskosten sich mittlerweile insbesondere bei Unternehmen mit differenzierter Qualitätsproduktion und kurzen Produktzyklen zu einem der entscheidenden Kostenfaktoren entwickelt haben. Doch diese

⁴ Porter 1991

Potentiale müssen wie gesagt genutzt werden. Insbesondere Akteure des Hamburger Maschinenbaus wiesen z. B. immer wieder auf den Kontrast hin zwischen dem Wettbewerbsdruck zur (bzw. den Chancen einer) regionalen Vernetzung einerseits und der nach wie vor vorherrschenden Sprachlosigkeit und den unübersehbaren Kommunikationsdefiziten zwischen den regionalen Unternehmen andererseits. Unsere Erfahrungen deuten darauf hin, dass die regionale Vernetzung – die Integration und Organisation von Akteursbeziehungen zu funktionierenden ‚Innovationssystemen‘ - ausgehend von einem als ‚Systemführer‘ auftretenden Großunternehmen und damit ‚top down‘ sehr viel besser gelingt, als ‚bottom up‘ über den regionalen Zusammenschluss mehrerer mittelständischer und kleiner Unternehmen.

Die zunehmende Konzentration auf die Innovationsfähigkeit eröffnete neue und für den Projekterfolg ganz wesentliche Perspektiven und Handlungsmöglichkeiten. Dieser Übergang war verbunden mit der schon erwähnten zumindest partiellen ‚Lösung‘ von den regionalen Stoffströmen einerseits, andererseits aber auch mit der ‚Lösung‘ von einem viel zu eng gefassten Verständnis von ‚ökonomischen Interessen‘. Im Zuge dieses Übergangs erweiterte sich der Blick von der sehr engen Fokussierung auf Kosten und Kostensenkung, welche die Effizienzstrategie und das Stoffstrommanagement dominiert, hin zum ökonomisch mindestens genauso wichtigen Aspekt der Steigerung der Erlöse. Effizienz- und Stoffstrommanagementstrategien begrenzen sich allzu oft selbst auf Kostensenkungen und Optimierungen entlang einer selbst nicht mehr in Frage gestellten Produkt- oder Technologielinie. Für den längerfristigen Unternehmenserfolg, für die Sicherung von Marktpositionen und vor allem für die Eroberung neuer Märkte sind aber Innovationen in vielen Fällen sehr viel wichtiger. Mit dem Übergang zur Innovationsstrategie wird der Blick frei auf weiter reichende ökonomische Ziele, die gar nicht mehr so weit entfernt sind von Nachhaltigkeitszielen, auf die längerfristige Unternehmensstrategie, die Innovationsfähigkeit, auf den Unternehmenswert und nicht zuletzt das Bild des Unternehmens in der – längst zur bedeutenden gesellschaftlichen Macht herangewachsenen – Öffentlichkeit. Mit Blick auf die langfristige Unternehmensstrategie lassen sich auch Aspekte der Rohstoffsicherung bzw. Ressourcenschonung diskutieren, die im Alltagsgeschäft derzeit noch nicht als Probleme wahrgenommen werden. In diesem Zusammenhang wird auch deutlich, dass sich die Verletzlichkeit von Unternehmen stark erhöht hat. Vor dem Hintergrund gesättigter Märkte und eines sich im Zuge der Globalisierung weiter intensivierenden Wettbewerbs stieg die Macht der Kunden und der Öffentlichkeit. Neben dem Preis und der (technischen) Funktion können zusätzliche Qualitätsmerkmale kaufentscheidend werden, ggf. auch nachhaltigkeitsrelevante Aspekte des Gesundheits-, Arbeits-, Umwelt- und Verbraucherschutzes. Ein positives Bild des Unternehmens – und bei Markenunternehmen insbesondere der Marke – in der Öffentlichkeit ist wichtig für den Erfolg der ‚Marke‘, für die Kundenbindung, für den Börsenkurs oder für Chancen auch wirklich die besten Mitarbeiter für das Unternehmen zu gewinnen. Die von den Unternehmen erwartete Wahrnehmung ihrer Verantwortung ist heute mehr als nur ‚Imagepflege‘, die man genauso gut bleiben lassen könnte. Sie kann entscheidend sein für den Aufstieg oder Niedergang. Hier liegen weit reichendere Möglichkeiten und Anknüpfungspunkte für Strategien zur Verminderung von Nachhaltigkeitsdefiziten in Kooperation mit Unternehmen als in einem zu eng verstandenen, sich nur auf Effizienzverbesserungen entlang einer existierenden Produkt-, Prozess- oder Technologielinie bzw. nur auf vorfindbare regionale Stoffströme konzentrierenden Stoffstrommanagement. Das Erfolgsrezept des Projekts ‚Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg‘ scheint gerade in der Kombination beider strategischer Ansätze gelegen zu haben, einerseits einer weit gefassten Konzeption von Stoffstrommanagement, die sich auf langfristige ‚Ressourcensicherung‘ konzentriert (und dabei auch von der Region weitgehend ‚emanzipiert‘) und andererseits einer Innovationsstrategie, die sich auf die Nutzung und Verbesserung der Vorteile der regionalen ‚home base‘ der ‚regionalen Innovationssysteme der Hamburger Metallwirtschaft konzentriert.

Das Projekt zeichnet sich im Wesentlichen durch zwei Zugänge aus, durch einen stofflichen und einen akteursorientierten. In dem einen Zugang, der sich auf die Möglichkeiten eines

Stoffstrommanagements konzentriert, stehen die Metalle mit ihren Begleit- und Nebenstoffströmen im Zentrum⁵. Im akteursorientierten Zugang sind es die Akteure der Metallwirtschaft⁶, wobei der Fokus auf den metallbasierten Innovationssystemen⁷ in der Region Hamburg liegt. Zu den wichtigsten Nachhaltigkeitsdefiziten, mit denen sich das Projekt auseinandersetzt, gehören somit der Umgang mit der nicht-regenerativen Ressource Metalle sowie sowohl die Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit als auch die soziale und ökologische Verantwortung der regionalen Unternehmenscluster der Metallwirtschaft einschließlich der vor- und nach gelagerten Wertschöpfungsketten.

⁵ Als Begleitstoffströme werden hier diejenigen Stoffströme bezeichnet, die nach dem jeweiligen Stand der Technik und den vorfindbaren Bedingungen notwendigerweise als Hilfs- und Reststoffe der Erzgewinnung und -anreicherung anfallen (Abraum, Schlämme sog. tailings) sowie die Hilfs- und Reststoffe der Metallerzeugung (Zuschlagsstoffe, Stäube, Schlacken). Die Begleitstoffströme werden zusammen mit den Stoffströmen, die mit dem Energieverbrauch verbunden sind, auch als ‚ökologische Rucksäcke‘ zusammen gefasst.

Als Nebenstoffströme werden diejenigen Stoffe bezeichnet, die je nach Bedarf als Prozesshilfsmittel in der Metallbearbeitung (z. B. Kühlschmierstoffe, Schleifschlämme, Strahlmittel), als Beschichtungen bzw. Oberflächenbehandlungsmittel für die Metallbehandlung (z. B. in Härtereien), für die Oberflächenreinigung und für den Korrosionsschutz eingesetzt werden (also z. B. Reinigungssysteme, Galvanikbäder, Zink, Chrom usw.). Hierher gehören auch die Hilfs-, Stör- und Reststoffe des Metallrecyclings, also anhaftender Schmutz, anhaftende Schad- und Störstoffe wie Flammschutzmittel, metallische und nichtmetallische Beschichtungen, aber auch die Zuschlagsstoffe des Metallrecyclings und die über legierte Metalle eingetragenen Legierungsbestandteile.

⁶ Unter dem Begriff Metallwirtschaft sind die Wertschöpfungsketten derjenigen Unternehmen zusammengefasst, die im Wesentlichen auf der werkstofflichen Basis von Metallen wirtschaften. Einbezogen wird dabei der gesamte Produktlebenszyklus, also auch die Rohstoffförderung und –verarbeitung, die zuordenbare Abfallwirtschaft inklusive Recycling sowie - soweit als möglich - auch die nachhaltigkeitsrelevanten Nebenstoffströme, z. B. Korrosionsschutz, Beschichtungen und Kühlschmierung.

⁷ Als ‚Innovationssystem‘ wird die Summe der für Innovationen wichtigen Akteure bezeichnet einschließlich der Art und Qualität ihrer Beziehungen untereinander und ihrer Einflussmöglichkeiten. Als Rahmenbedingungen gelten dabei im Wesentlichen die Formen staatlicher Regulation und die Anforderungen der jeweiligen Märkte. Im Fokus stehen die Innovationssysteme der Metallwirtschaft der Region Hamburg, also ‚regionale Innovationssysteme‘ mit einem werkstoffbezogenen (und damit zumindest teilweise sektoralen) Kernbereich. Da sowohl die Wirtschaftsbeziehungen als auch die Stoffströme und somit auch die Nachhaltigkeitsdefizite der Hamburger Metallwirtschaft weit über die Region hinausgreifen, muss auch die Betrachtung der Innovationssysteme entsprechend ausgeweitet werden hin zu einer integrierten Betrachtung von Produktlinien und Wertschöpfungsketten und somit auch zu eher ‚sektoralen Innovationssystemen‘. Um auch in diesen Systemen die Bedeutung der Hamburger Metallwirtschaft deutlich zu machen, greifen wir zum Bild der Hamburger Metallwirtschaft als ‚Gravitationszentrum‘ in diesem internationalen Geflecht.

3 Nachhaltigkeit als Ziel und Nachhaltigkeitsbewertung

Im Folgenden soll zunächst das Verständnis von Nachhaltigkeit dargelegt werden, das dem Projekt ‚Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg‘ zugrunde lag. Diese Darlegung der Zielperspektive und der Indikatoren auf einer sehr allgemeinen Ebene ist so knapp wie möglich gehalten. Viel wichtiger sind die Ergebnisse der Erprobung von Nachhaltigkeitsstrategien in Kooperation mit Unternehmen. Es gibt zwar eine geradezu unüberschaubare Zahl an Veröffentlichungen über das Ziel der Nachhaltigkeit, über Nachhaltigkeitsindikatoren, auch über Agenden, Pläne und Programme, aber es gibt erstaunlich wenige Veröffentlichungen, in denen Erfahrungen mit Nachhaltigkeitsstrategien reflektiert werden.

Für konkrete Schritte in Richtung einer Nachhaltigen Metallwirtschaft ist zunächst die Operationalisierung des Nachhaltigkeitsziels zentral, einerseits im Hinblick auf die Metalle und den Umgang mit ihnen und zum anderen im Hinblick auf die Akteure der Metallwirtschaft. Anschließend soll von den Erfahrungen berichtet werden, die im Rahmen des Projekts ‚Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg‘ beim Versuch gemacht wurden, Nachhaltigkeitsstrategien konkret in einer Region umzusetzen. Zwei Aspekte stehen dabei im Zentrum, die Reflektion von Ansatz und Reichweite des Versuchs, Nachhaltigkeitsstrategien *in Kooperation mit Unternehmen* umzusetzen und die Reflektion auf die Möglichkeiten und Grenzen eines auf Metalle und Metallnebenstoffströme bezogenen ‚*Stoffstrommanagements*‘.

3.1 Nachhaltigkeit als Ziel

Nachhaltigkeit ist ein Ziel von hohem Abstraktionsgrad und nicht zuletzt dadurch auch hohem Integrationspotential. Die Konkretisierung, das ‚Herunter Brechen‘ auf real mögliche nächste Schritte ist wichtig, wenn man diesem Ziel näher kommen will, auch die Erarbeitung von Indikatoren, mit deren Hilfe Projekte und Schritte in Richtung Nachhaltiges Wirtschaften ‚bewertet‘ werden können. Nachhaltigkeit ist kein ein für alle mal feststehendes Ziel. Für Nachhaltigkeitsprojekte ist es wichtig, zu wissen, ob und inwiefern sie letztendlich tatsächlich einen Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit zu leisten imstande sind. Richtungssicherheit angesichts eines ‚beweglichen Ziels‘ mit einer dreidimensionalen Zielperspektive (ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit) kann aber nicht mehr bedeuten, als dass zumindest in der Resultante der drei ‚Zielvektoren‘ die Ergebnisse von Projekten in die ‚richtige Richtung‘ zeigen sollen.

Nachhaltigkeit ist also *nicht* einfach die Fortsetzung der Umweltpolitik oder der 3.Welt-Politik unter einer neuen Überschrift. Wir finden zwar viele Anliegen, die schon seit Jahrzehnten verfolgt werden, im Nachhaltigkeitskonzept wieder, aber sie werden und wurden im Rahmen dieses Konzepts immer auch stark verändert. Kein einziges Anliegen, sei es sozialer, ökonomischer oder ökologischer Art, kommt aus dem Nachhaltigkeitsdiskurs so wieder heraus, wie es in ihn eingetreten ist.

Das Neue am Nachhaltigkeitsdiskurs konzentriert sich auf folgende Punkte:

- Erstens die *Langfristorientierung und die globale Orientierung*. In unserem Alltag denken wir nicht oft über die Entwicklung der nächsten 30 oder gar 50 Jahre im ‚Raumschiff Erde‘ nach.
- Zweitens die *Dreidimensionalität des Ziels*. Es geht um soziale, ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit gleichermaßen.
- Drittens die *Orientierung an den Tragekapazitäten* der ökologischen, sozialen und ökonomischen Basis einer nachhaltigen Entwicklung.

Sowohl im öffentlich-politischen als auch im wissenschaftlichen Nachhaltigkeitsdiskurs lassen sich ein eher defensives und ein eher offensives Verständnis von Nachhaltigkeit

unterscheiden. Im defensiven Verständnis ist Nachhaltigkeit eine Mindestbedingung für ‚zukünftige Optionen‘, für die möglichst weitgehende Vermeidung von Einschränkungen der Entscheidungsmöglichkeiten zukünftiger Generationen. In einer Art ‚systemtheoretischen Konkretisierung‘ der Formulierung aus dem Brundlandt-Report: *„to meet the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs“*⁸, lässt sich das Nachhaltigkeitsziel in dieser defensiven Variante folgendermaßen definieren:

Nachhaltig ein Weg in die Zukunft, der in der Lage ist, seine eigenen Existenzbedingungen zu reproduzieren und zumindest größere Systemzusammenbrüche in den wichtigsten ‚Supportsystemen‘ (also in den ökologischen, sozialen und ökonomischen Subsystemen) zukünftiger Gesellschaften zu vermeiden. Auf diese Weise sollen zukünftigen Generationen möglichst viele und möglichst weit reichende Entscheidungsmöglichkeiten offen stehen, nicht zuletzt auch hinsichtlich der Nutzung und/oder Substitution von (nicht regenerierbaren) Ressourcen.

Nachhaltigkeit ist auch in diesem Verständnis ein normatives Ziel, das unmittelbar einleuchtet und auf allgemeine Zustimmung stößt. Aber seine Formulierung und Ausgestaltung kann jetzt eher funktional erfolgen. Das Ziel klingt dadurch noch abstrakter, und der Weg dahin sieht ziemlich technokratisch aus. Auf das Ausmalen einer wünschenswerten Zukunft wird weitgehend verzichtet.

Doch auch dieses defensive funktionale Nachhaltigkeitsziel ist geprägt durch gesellschaftliche Werte. Im Vordergrund stehen die Werte Freiheit (verstanden als ‚Verfügen über Optionen‘) und intergenerationelle Gerechtigkeit mit Blick auf das Erbe, welches wir zukünftigen Generationen hinterlassen, sowohl an materiellen, sozialen, institutionellen, kulturellen und ökologischen Werten als auch an entsprechenden Schäden, Zerstörungen und nicht mehr zur Verfügung stehenden ‚Ressourcen‘. Natur und Ökologie kommen damit zunächst einmal vorwiegend als Ressource und als Naturgrundlage ins Spiel, mit Fokus auf ihre Tragekapazitäten und im Hinblick auf die gesellschaftlichen Werte Freiheit und Gerechtigkeit. Das mag nach einer utilitaristischen Verkürzung bzw. nach ‚schwacher Nachhaltigkeit‘ klingen. Im Natur schützenden bzw. bewahrenden Effekt dürfte sich ein solcher Ansatz allerdings kaum von einem ‚bioethischen‘ oder ‚biozentrischen‘ Ansatz bzw. von ‚starker Nachhaltigkeit‘ unterscheiden. Gerade weil wir nicht wissen können, was zukünftigen Generationen in welcher Dimension auch immer als ‚wertvoll‘ erscheinen wird, und was für die Stabilität und insbesondere Entwicklungsfähigkeit (Evolutionsfähigkeit) von Ökosystemen ‚essentiell‘ ist, resultiert auch aus einem wohl verstandenen - d. h. auf Langfristigkeit hin angelegten - utilitaristischen Ansatz ein sehr weit reichender Schutz- und Bewahrungsanspruch.

Ein zweites grundlegendes Element in dieser Herangehensweise ist die Langfristperspektive und die globale Perspektive. Die zeitliche und die Raumdimension sind insbesondere für die Gewichtung von Problemen und Lösungen wichtig. Sehr langfristige bis hin zu irreversiblen Wirkungen haben ein höheres Gewicht als kurzfristige und mehr oder minder reversible, dasselbe gilt für großräumige tendenzielle globale Wirkungen im Vergleich zu kleinräumigen lokalen und regionalen. Besonders problematisch sind schließlich Entwicklungen, die langsam und schleichend daher kommen, die aber dann, wenn sie wahrgenommen werden, schon so weit fortgeschritten sind, dass Gegenmaßnahmen zu spät kommen. Die Klimaproblematik, die Biodiversitätsproblematik und die Ressourcenproblematik sind von dieser Art. Somit stehen beim defensiven Nachhaltigkeitsverständnis die nicht direkt wahrnehmbaren eher langfristigen und schleichend sich entwickelnden Probleme und Entwicklungen im Zentrum, also diejenigen Nachhaltigkeitsdefizite, für deren Wahrnehmung und Bearbeitung wissenschaftliche Erkenntnisse eine besonders wichtige Rolle spielen.

Vom defensiven Nachhaltigkeitsverständnis kann ein offensives unterschieden werden. Es ist erfüllt von allen unseren Wünschen, Hoffnungen und Utopien. Dies bringt Engagement und Wärme in eine ‚Nachhaltigkeitsbewegung‘, die dem oben skizzierten defensiven eher technokratisch-funktionalen Ansatz eher fehlt. Das führt aber auch dazu, dass Menschen mit

⁸ WCED 1987

einem positiven Anliegen, aus welcher Bewegung sie auch kommen mögen, der Überzeugung sind, sie hätten ‚immer schon‘ Nachhaltigkeitsziele verfolgt, und sie könnten demzufolge in ihren jeweiligen Bewegungen weitermachen wie bisher. In das offensive Verständnis von Nachhaltigkeit sind viel stärker auch aktuelle und kurzfristige Anliegen integriert, angefangen von der Lösung bzw. Milderung der Einkommensverteilung innerhalb der Industrienationen und noch viel stärker zwischen ‚Nord‘ und ‚Süd‘, über den Kampf gegen das Zurückdrängen indigener Kulturen bis hin zu mehr Gerechtigkeit zwischen den Geschlechtern. Nachhaltiges Leben und Wirtschaften ist hier weit mehr als eine Mindestbedingung, als die Vermeidung von Systemzusammenbrüchen und die Beachtung von Tragekapazitäten. Nachhaltigkeit wird hier viel stärker positiv besetzt und ausgemalt. Nachhaltigkeit scheint in diesem Verständnis eine sehr alte Metapher abzulösen: Das schon von Aristoteles anvisierte ‚Gute Leben‘, nun allerdings ohne Sklaverei und Ausbeutung, weder auf Kosten der Natur und der Tiere, noch auf Kosten gegenwärtig lebender Menschen, noch auf Kosten zukünftiger Generationen.

3.2 Nachhaltigkeitskriterien

Der größte Teil der nationalen und internationalen Nachhaltigkeitsliteratur scheint sich mit dem Ziel und mit Nachhaltigkeitsindikatoren zu befassen⁹. Ob dies in einem solchen Ausmaß fruchtbar und berechtigt ist, mag zunächst dahingestellt bleiben. Auf jeden Fall sind sowohl die Zielbestimmung als auch die Bewertung von Schritten in Richtung Nachhaltigkeit wichtig und zugleich extrem komplex und entsprechend unübersichtlich. Das fängt schon mit dem Verständnis des Begriffs ‚Indikator‘ an. Deshalb sollen hier zunächst ein paar Bemerkungen zur Klärung von Begriffen und Herangehensweisen vorangestellt werden. Es ist hilfreich, zwischen Bewertungsverfahren, Bewertungsmethoden, Bewertungskriterien und Indikatoren zu unterscheiden. Bewertungsverfahren sind Prozesse und Diskurse, in denen u. a. Bewertungsmethoden zum Tragen kommen. Im Zentrum stehen aber die Verfahren selbst mit ihrer Diskursordnung und meist auch mit bestimmten Formen der Beteiligung von Interessens- und Anspruchsgruppen oder der Öffentlichkeit (Beispiele sind Verfahren zur Beteiligung von Anwohnern oder der Öffentlichkeit, aber auch so genannte Planungszellen oder Konsensuskonferenzen). Bewertungsmethoden haben die Funktion, z. B. für derartige Bewertungsdiskurse gute, d. h. mehr oder minder wissenschaftlich begründbare, Argumente zu liefern. Sowohl in Bewertungsverfahren als auch bei Bewertungsmethoden geht es somit um Legitimation, bei Verfahren eher um ‚demokratische‘ Legitimation, weil hier auch Kompromissbildung und Partizipation eine zentrale Rolle spielen, bei Bewertungsmethoden eher um wissenschaftliche Legitimation, im Sinne der wissenschaftlichen Orientierung an Objektivität (Intersubjektivität). Insofern werden an Bewertungsverfahren und an Bewertungsmethoden zum Teil ähnliche, zum Teil aber auch ganz unterschiedliche Ansprüche gestellt¹⁰.

Innerhalb von Bewertungsmethoden kommen in der Regel *Bewertungskriterien* zum Einsatz. An sie werden im großen Ganzen dieselben Anforderungen gestellt wie an die Methoden (Objektivierbarkeit, Fruchtbarkeit/Leistungsfähigkeit und Handhabbarkeit). Wenn es mit Blick auf das ganzheitliche Ziel der Nachhaltigkeit um den dazu nötigen Einsatz eines Methodenmixes bzw. eines Kriterienrasters geht, durch welche die Nachhaltigkeitsprobleme in allen drei Dimensionen adäquat erfasst werden sollen, werden diese Anforderungen noch ergänzt um die Forderung nach Vollständigkeit (angemessene Repräsentanz), Konsistenz und Unabhängigkeit von einander. Alle diese berechtigten Anforderungen tragen dazu bei, dass das Feld der Methoden und Kriterien der Nachhaltigkeitsbewertung so kompliziert und schwierig ist, wenn man es systematisch anzugehen versucht. Der Wunsch nach nur einer einzigen effektiven und effizienten Methode und nach nur einem wesentlichen Kriterium ist allzu verständlich. Praktisch und faktisch scheinen sich deshalb ganz unabhängig von all diesen komplexen Bewertungsdebatten aus pragmatischen Gründen immer wieder extrem

⁹Vgl. die Auflistungen z. B. in IISD 2002 und OECD 1999.

¹⁰ Vgl. von Gleich 1998/1999

einfache Bewertungsmethoden und –kriterien durchzusetzen, wie z. B. der ‚kumulierte Energieaufwand‘ (KEA)¹¹.

Schließlich müssen in diesem ganzen Feld der Nachhaltigkeitsbewertung noch *Indikatoren* angesprochen werden. Indikatoren können den Erfüllungsgrad von Kriterien anzeigen oder die Operationalisierung von Kriterien darstellen, z. B. im Sinne einer Entwicklung von (Mess)Werten. Die starke Verbreitung, die der Begriff der Indikatoren in der Nachhaltigkeitsdebatte im deutschsprachigen Raum gefunden hat, könnte aber auch schlicht einem Rückübersetzungsproblem geschuldet sein, weil im englischsprachigen Raum der Begriff ‚indicator‘ oft für dasjenige steht, was hierzulande bislang als Kriterium bezeichnet wurde.

Kriterien sind aber keine wertneutralen ‚Instrumente‘. Sie sind in theoretische Kontexte eingebunden und von ihnen abhängig. Zwei Kontextbereiche sind dabei besonders wichtig:

1. Der ‚Gegenstandsbereich‘ bzw. das unmittelbare Handlungsfeld.
Hier geht es z. B. um die Bewertung von Innovationen in der Produktgestaltung oder Produktnutzung, um die Bewertung von Innovationen bei Stoffwandlungsprozessen oder von Versuchen zur Schadstoffsubstitution. Aus diesen Kontexten heraus werden ‚bottom-up‘ Bewertungskriterien entwickelt.
2. Der theoretische und strategische Hintergrund, in den diese konkreten Schritte eingebunden sind. Im Rahmen einer defensiven Strategie, die sich auf den Erhalt von Mindestbedingungen, also an Tragekapazitäten und entsprechenden Qualitätszielen konzentriert, sind z. B. Kriterien, die sich am Notwendigen (am ‚Überleben‘), an Wirkungsmodellen und Tragekapazitäten orientieren, von besonderer Bedeutung. Sie dienen eher der Evaluation. Hier geht es also um Erfolgskontrolle, um Planerfüllung bzw. den Grad der Zielerreichung zumindest für diejenigen Fälle, für die Nachhaltigkeitsziele schon heute relativ klar und im weitgehenden Konsens bestimmt werden können. Beispiele für diese Herangehensweise sind Klimaschutzziele, Nationale Umweltpläne wie sie in den Niederlanden existieren, das ‚Kursbuch Nachhaltigkeit‘ der Hamburger Umweltbehörde oder die von der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Stuttgart für Baden-Württemberg aufgestellten Nachhaltigkeitsindikatoren (vgl. Renn u. a. 2000).

Im Rahmen einer Strategie, die sich am Wünschbaren (am ‚guten Leben‘) orientiert, geht es hingegen eher um Kriterien, mit deren Hilfe die allgemeinen Nachhaltigkeitsziele in verschiedenen Bedürfnisfeldern konkretisiert und operationalisiert werden. Wenn solche immer wieder neu auszuhandelnden kleinschrittigen Innovationsprozesse im Zentrum stehen, geht es stärker um Richtungssicherheit, also um die Frage, ob diese oder jene Innovation (oder Kette von Innovationen) zumindest in der Resultante des dreidimensionalen Zielraums der Nachhaltigkeit in die ‚richtige‘ Richtung zeigt.

Auch für die Identifikation von Nachhaltigkeitsproblemen der regionalen und globalen Metallwirtschaft, sowie für die Bewertung der Ergebnisse der im Rahmen des Projektes ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ durchgeführten Teilprojekte, sind Kriterien wichtig. Die Anfangsphase des Projekts war deshalb stark geprägt durch Strategiefragen und Fragen der Nachhaltigkeitsbewertung einschließlich der Entwicklung eines die drei Nachhaltigkeitsdimensionen angemessen repräsentierenden umfassenden Kriterienrasters. Das Ergebnis dieser Bemühungen ist in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Das in mehrere Ebenen gegliederte Kriterienraster spiegelt einerseits eine Bewegung der Ableitung wider, sozusagen ‚top down‘ ausgehend vom abstrakten integrierten Ziel des Nachhaltigen Wirtschaftens. Hinzu kommt eine Bottom-up-Bewegung, ausgehend von den jeweils vorfindbaren Problemkonstellationen in den Teilprojekten. Top-down wurden auf der ersten Ebene aus dem dreidimensionalen Leitbild der Nachhaltigkeit sieben Unterziele (zielorientierte Kriterien) abgeleitet. Diese wurden auf der zweiten Ebene ergänzt durch je drei Kriterien, die sich aus sehr allgemeinen systemtheoretischen Überlegungen zur

¹¹ Zum KEA vgl. VDI 1995

„Überlebensfähigkeit von Systemen in dynamischer Umgebung“ entwickeln lassen, und drei Kriterien zur Operationalisierung des Vorsorgeprinzips. Auf der dritten Ebene folgen je drei Kriterien, die sich an Tragekapazitäten und drei weitere, die sich an Wirkungsmodellen orientieren. Aus den jeweiligen Handlungsfeldern heraus wurden zusätzlich in einer Gegenbewegung bottom-up weitere, insbesondere stoffbezogene, prozessbezogene und produktbezogene Kriterien entwickelt¹².

Die Kriterien der zweiten Ebene betreffen den „Umgang mit Systemen“, insbesondere verschiedene Arten von Eingriffen in Systeme und die daraus jeweils resultierenden potentiellen Wirkungsspektren. Ziel auf dieser Ebene ist letztlich ein „angemessener“ (gegenstandsgemäßer) bzw. „angepasster“ Umgang mit Systemen im Sinne einer Operationalisierung des Vorsorgeprinzips nicht zuletzt durch größtmögliche Behutsamkeit. Das Gegenteil davon, also der Charakter sehr weit reichende Eingriffe mit sehr weit reichenden Konsequenzen (bis hin zu global und irreversibel), wird mit dem Kriterium der „Eingriffstiefe“ zu fassen versucht.

Zwischen den zielorientierten, theoretisch abgeleiteten Kriterien der ersten beiden Ebenen einerseits und den an Tragekapazitäten und Folgen orientierten Kriterien der dritten Ebene und erst Recht den Einzelaspekte abdeckenden Kriterien der vierten Ebene andererseits lassen sich zwar Bezüge herstellen, insgesamt verbleibt aber doch eine unübersehbare Lücke, die sich nur punktuell wird schließen lassen.

Tabelle 1 _ Kriterienraster für eine integrierte Nachhaltigkeitsbewertung

Vier Ebenen von Bewertungskriterien

I. Top down	
1. Ebene (Ziele): Mindestbedingungen eines guten Lebens	<p>a) Ökologische, soziale und ökonomische Nachhaltigkeit</p> <p>b) Abgeleitete Ziele, z.B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erhalt / Vermehrung von Human-, Sach- und Naturkapital • Nachhaltigkeitsoptimierte Marktfunktionen • Freiheit, Selbstbestimmung • Gerechtigkeit (intra- und intergenerativ) • Gesundheit, Lebensqualität • Vermeidung von Langfrist-Intoxikation • Erhaltung der Biodiversität
2. Ebene (Prozess): Entwicklungsfähigkeit und Vorsorge	<p>a) Systemtheoretische Kriterien der ‚Evolutionsfähigkeit‘, z.B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reproduktionsfähigkeit • Wandlungsfähigkeit • Wirksamkeit <p>b) Vorsorgekriterien, z.B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eingriffstiefe / Fehlerfreundlichkeit • Entropische Effizienz • Konsistenz

¹² Alle diese „Ableitungen“, Abstraktionen und Auswahlvorgänge sind natürlich wertbehaftet. Das Mindeste, was hierzu gefordert werden kann, ist somit Offenlegung, Transparenz und Nachvollziehbarkeit.

3. Ebene (konkrete Voraussetzungen): Das „Überleben“

a) Tragekapazitätskriterien, z.B.:

- Volkswirtschaftliche Krisenfestigkeit, Fähigkeit zur Reproduktion des Humankapitals + Naturkapitals
- Stabilität regionaler Unternehmenscluster
- Tragfähigkeit sozialer Netze, sozialer Zusammenhalt, demokratische Verfasstheit
- Klimastabilität, Critical loads
- Ökologischer Fußabdruck

b) Wirkungsmodell-Kriterien, z.B.

- Zur Monopolbildung beitragend
 - Krebs erzeugend
 - Saurer Regen
 - Ozonschicht schädigend
-

II. Bottom Up

4. Ebene (Innovationen): Die kleinen Schritte, prozess-, produkt-, stoff- und technikbezogen

Einzelaspekte wie z. B.

- Kumulierter Energieaufwand
 - Energieeffizienz
 - Lärminderung
 - Schadstoffvermeidung
 - Regenerierbarkeit
 - Kreislaufschließung
 - Recyclierbarkeit
 - Reparierbarkeit
 - Quantität und Qualität von Arbeitsplätzen
 - Arbeitssicherheit
-

Was bleibt, ist das Problem der Gewichtung. Gewichtungsfragen sind Wertfragen, erfordern also einen gesellschaftlichen Diskurs. Eine Gewichtung nach der räumlichen und zeitlichen Dimension der Probleme bzw. folgen dürfte allerdings weitgehend konsensfähig sein. Dies soll kurz am Beispiel der tragekapazitätsorientierten Kriterien verdeutlicht werden: Der Zusammenbruch einzelner Firmen (ihr Verdrängen aus dem Markt), der Crash einzelner Sozialsysteme (Marginalisierung einiger Stadtviertel), der Crash einzelner Ökosysteme (Umkippen einiger Teiche) wäre auf dem Weg zum Nachhaltigkeitsziel durchaus noch zu akzeptieren, wenn es zugleich in anderen Zieldimensionen voran geht. Schritte, bei denen es in allen drei Dimensionen der Nachhaltigkeit gleichermaßen vorangeht (echte win-win-win-Schritte), werden schließlich eher die Ausnahme bleiben. Je größer allerdings die gefährdeten Systeme und je irreversibler die Schäden werden, umso gravierender ist die Problematik. Angesichts eines drohenden Zusammenbruch ganzer Nationalökonomien oder ganzer sozialer Sicherungssysteme (z. B. Gesundheitswesen, Alterssicherung) oder des Umkippen ganzer Meere sieht das somit anders aus. Das bedeutet also, dass globale Probleme wie Klimaveränderungen höher gewichtet werden als reversible und regionale Probleme wie Sommersmog, dass die Gerechtigkeit zwischen den Generationen stärker wiegt, als diejenige innerhalb einer Generation und die langfristige Verfügbarkeit nicht-regenerativer Ressourcen höher als aktuelle Preissignale, die ein Recycling als derzeit unwirtschaftlich erscheinen lassen.

Nun werden die Dimensionen Raum und Zeit bekanntlich als Kontinuen dargestellt. Es gibt keine Schwellenwerte. Bezüglich einzelner Probleme, wie z. B. der Erhaltung der Biodiversität muss geklärt werden, auf welche Raumeinheiten sie sich beziehen soll. Das Aussterben von Arten auf globaler Betrachtungsebene ist unwiderruflich und schon mit Blick auf die Entwicklungschancen zukünftiger Generationen absolut zu vermeiden, das

Verschwinden von Arten aus bestimmten Landstrichen allerdings nicht unbedingt. Unsicherheit besteht somit bei der Frage, wie viele Landstriche wir sozusagen ‚verloren geben‘ können, ohne zugleich das globale Aussterben zu riskieren. Das Vorsorgeprinzip, dem in Nachhaltigkeitsstrategien eine besondere Bedeutung zugemessen werden muss, zwingt uns hier zu äußerster Behutsamkeit. Vor diesem Hintergrund muss zumindest für die Problembereiche ‚Erhalt der Biodiversität‘ sowie ‚Akkumulation von Schwermetallen‘ konstatiert werden, dass bei ihnen die Unterscheidung zwischen kurzfristigen, akuten und regional begrenzten Problemen einerseits sowie schleichenden langfristigen, globalen und irreversiblen Probleme andererseits nicht durchzuhalten ist. Hier empfiehlt sich nach dem Vorsorgeprinzip eine möglichst weit gehende Vermeidung.

Die Ziel- und die Indikatorendiskussion der Nachhaltigkeit kann wie schon erwähnt beliebig komplex entwickelt werden. Darunter leidet leider oft die Praktikabilität. Das System eines objektivierbaren, handhabbaren, leistungsfähigen und möglichst vollständigen Bewertungsrasters sollte möglichst ‚einfach‘ gehalten werden. Das wurde hier versucht, indem auf allen Ebenen dem defensiven am Notwendigen (also an den Mindestvoraussetzungen für Nachhaltigkeit) orientierten Nachhaltigkeitsverständnis der Vorzug gegeben wurde. Damit kann auf die Ausmalung des Wünschenswerten, auf eine Utopie ‚Nachhaltigen Wirtschaftens‘, weitgehend verzichtet werden.

Das Kriterienraster in Tabelle 1 stellt selbstverständlich nur einen ersten orientierenden Versuch dar. Wichtiger als die konkrete Ausfüllung der Felder ist aber die Struktur des Rasters, mit ihren vier Bewertungsebenen sowie der Kombination von top-down- und bottom-up-approach. Zu dieser Struktur und zu einigen darin enthaltenen Kriterien sind noch erläuternde Bemerkungen angebracht.

3.2.1 Zielorientierte Nachhaltigkeitskriterien

Auf dieser Kriterienebene werden die Ziele und Werte bzw. Leitbilder aus den drei Nachhaltigkeitsdimensionen zum Ausgangspunkt genommen, also Gerechtigkeit, Freiheit, Gesundheit und individuelle Entfaltungsmöglichkeiten bei gleichzeitiger Stabilität und Entfaltung von Wirtschaft, sozialem Zusammenhalt und Natur als Voraussetzungen für ein selbst bestimmtes ‚gutes Leben‘. Ein grundsätzliches Problem solcher an Werten bzw. Leitbildern orientierter Kriterien ist die vorhandene und weiter zunehmende gesellschaftliche Varianz (bis hin zur Kontingenz) von Werten in modernen Gesellschaften. Welche Werte sind (noch?) allgemeingültig? Reicht hier ein allgemeiner Konsens der Meinungsführer aus? Oder ist die Nachhaltigkeitsdebatte gar nur die Fortsetzung eines ‚westlichen Kulturimperialismus‘? Derzeit ist das Nachhaltigkeitsziel über alle gesellschaftlichen Gruppen und Kontinente hinweg noch konsensfähig wie kaum ein zweites. Wir riskieren allerdings diesen bisher noch auf einer sehr allgemeinen Ebene vorhandenen breiten gesellschaftlichen Konsens, wenn jeder für sich alles überhaupt Wünschbare, alles ‚Wahre, Gute und Schöne‘ darunter subsumiert, wenn jeder glaubt, seine (alten und neuen) Utopien von Freiheit, Gleichheit und Brüderlichkeit, von Kommunismus, Spiritualismus oder Ökozentrismus (Deep Ecology) oder von ‚nachhaltigem wirtschaftlichem Wachstum‘ völlig ungebrochen im Rahmen der Nachhaltigkeitsdebatte wieder zu finden bzw. mehrheitsfähig machen zu können. Es empfiehlt sich also eine Selbstbeschränkung im Zieldiskurs der Nachhaltigkeit.

Immerhin haben sich hier längst einige Hauptwerte herauskristallisiert. Im Zentrum steht und stand von Anfang an die Gerechtigkeit und zwar als Gerechtigkeit sowohl zwischen den heute lebenden als auch - und das war die wesentlich neue Dimension - insbesondere zwischen den heute lebenden und den zukünftigen Generationen. Der Schwerpunkt liegt dabei weniger auf der Verteilungsgerechtigkeit (also auf der materiellen Gleichheit), sondern stärker bei der Verteilung der Entwicklungschancen (Chancengerechtigkeit). Wenn man die letztere allerdings wirklich ernst nimmt, kommt dem Umgang mit dem globalen ‚Erbe der Menschheit‘, ökonomisch gefasst unter anderem in der Vorstellung von der ‚Erhaltung (und Vermehrung) des volkswirtschaftlichen, des Human- und des Naturkapitals‘, ein besonders hoher Stellenwert zu. Dann dreht sich ein zentraler Aspekt von Nachhaltigkeitsstrategien um die Reichweite und Nutzungsrate natürlicher Ressourcen und um den Erhalt der

Biodiversität. Bei beiden handelt es sich im Übrigen nicht nur um ‚ökologische‘, sondern ebenso um ‚soziale‘ und ‚ökonomische‘ Ziele. Dasselbe gilt auch für die nächste Gruppe von Kriterien, bei denen es vor allem um die Tragekapazitäten überlebenswichtiger Subsysteme geht.

3.2.2 Tragekapazitätsorientierte Kriterien

Quelle dieser Gruppe von Kriterien sind sozusagen alle unsere bisherigen schlechten Erfahrungen, angefangen von Unternehmenskonkursen bis zum Börsencrash, vom Arbeitsstress bis zur sozialen Kälte und Vereinsamung, von der einzelnen Mülldeponie bis zum Treibhauseffekt. Auf diesen schlechten Erfahrungen aufbauend wurden Wirkungsmodelle erarbeitet (wissenschaftlich aufklärbare Ketten von Ursache-Wirkungsbeziehungen) und - dort wo dies bisher möglich war - auch Aussagen über Tragekapazitäten formuliert (also z. B. im ökologischen Bereich Aussagen über critical loads oder carrying capacities).

Bisher gibt es noch sehr wenig Wissen über Tragekapazitäten. Zumindest in der ökologischen Dimension liegen aber schon vier bis fünf operationalisierbare Kriterien vor, die sich an Tragekapazitäten orientieren: Je zwei im Klimabereich (Treibhauseffekt und Ozonloch) und je zwei als ‚critical loads‘ und ‚critical levels‘ beim Eintrag eutrophierender und versauernder Substanzen in Ökosysteme. Zudem wird mit der Bestimmung des ‚ökologischen Fußabdrucks‘ versucht, den Aspekt der Tragekapazitäten nicht allein auf der Outputseite der Schnittstelle Ökosphäre/Technosphäre zu operationalisieren, sondern auch auf der Inputseite, also der Versorgung mit regenerierbaren Ressourcen¹³. Zur Frage ökonomischer Tragekapazitäten, z. B. auf nationaler Ebene zu der Frage, wie viel Prozent des Bruttosozialprodukts einer Volkswirtschaft für Umsteuerungsprozesse zur Verfügung stehen, ohne dass schon allein dadurch ein Crash riskiert wird, oder zur Frage der ‚Tragekapazität des sozialen Zusammenhalts‘ gibt es noch nicht einmal eine wissenschaftliche, geschweige denn eine öffentliche Debatte.

Dies ist durchaus nachvollziehbar, weil die Bestimmung von Tragekapazitäten komplexer und dynamischer Systeme auf schier unüberwindliche Erkenntnisprobleme stößt. Unser Wissen über Tragekapazitäten entspricht allenfalls kleinen (in ihrer Qualität auch noch höchst umstrittenen) ‚Wissensinseln‘ in einem Meer von ‚Nicht-Wissen‘ (bzw. auch von ‚Nicht-Wissbarkeit‘).

Wenn es allerdings gelingt, tragekapazitätsorientierte Kriterien zu entwickeln, geht von ihnen oft eine weit reichende Debatte und nicht zu unterschätzende Wirkung aus. So wurde z. B. aus dem Wirkungsmodell ‚Treibhauseffekt‘ erst durch die Arbeiten des IPCC ein tragekapazitätsorientiertes Kriterium für anthropogene CO₂-Emissionen entwickelt, das dann sehr weit reichenden Einfluss auf die politischen Prozesse bekam. So hat in Deutschland z. B. der WGBU¹⁴ aufbauend den Arbeiten des IPCC in seinem Jahresgutachten 1995 formuliert, dass wir den Treibhauseffekt ohnehin nicht mehr gänzlich verhindern können, sondern dass es jetzt darauf ankäme, ihn so zu verlangsamen, dass die ökologischen, ökonomischen und sozialen Systeme noch die Chance hätten, sich ohne Systemcrash an die Erwärmung anzupassen (vgl. WGBU 1995). Ausgehend von der IPCC-Schätzung, dass dies der Fall sein könnte, wenn die Erwärmungsrate nicht 1 °C in den kommenden hundert Jahren übersteigt (derzeitige Tendenz ca. 3°C in 100 Jahren), lassen sich dann ‚noch zulässige Höchstemissionen‘ an treibhausrelevanten Gasen aus anthropogen genutzten fossilen Quellen für die kommenden hundert Jahre abschätzen. Dabei wird ganz im Sinne des Tragekapazitätsansatzes davon ausgegangen, dass diese 1°C Erwärmung in hundert Jahren die Anpassungskapazitäten (resilience) der globalen ökologischen, sozialen und ökonomischen Subsysteme nicht überstrapaziert.

¹³ Vgl. Rees; Wackernagel 1995

¹⁴ Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung ‚Globale Umweltveränderungen‘ 1995

3.2.3 Wirkungsmodellorientierte Kriterien

Mit Blick auf die Perspektiven einer ‚Nachhaltigen Metallwirtschaft‘ sind insbesondere stoffbezogene Wirkungsmodelle relevant und darunter insbesondere auch toxikologische und ökotoxikologische.

In der Humantoxikologie gehört dazu z. B. die Klassifizierung von Stoffen als ‚akut toxisch – chronisch toxisch‘; ‚reproduktionstoxisch, incl. fruchtschädigend‘; ‚krebserregend‘, ‚erbgutschädigend‘; ‚sensibilisierend (Allergien auslösend)‘; hinzu kämen ggf. noch Unannehmlichkeiten wie ‚übel riechend‘. Im Bereich der Ökotoxikologie geht es um die Klassifizierung von Stoffen als: ‚versauernd‘; ‚eutrophierend‘; ‚wassergefährdend‘; ‚persistent‘; ‚naturfremd‘ und ‚bioakkumulativ‘, ‚die Ozonschicht zerstörend‘; ‚zur bodennahen Ozonbildung beitragend (Sommersmog)‘; ‚zum Treibhauseffekt beitragend‘.

Solche Aufzählungen (öko-)toxikologischer Kriterien sind nur als Beispiele zu verstehen. Von einer vollständigen Liste aller unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten für die Metallwirtschaft relevanten Wirkungsmodelle sind wir weit entfernt.

Ein grundlegenderer Mangel sowohl der tragekapazitätsorientierten als auch der wirkungsmodellorientierten Kriterien liegt allerdings in ihrem Angewiesensein auf schon bekannte Wirkungen. Das Vorsorgeprinzip ist auf diesem Weg nicht wirklich umzusetzen. Es fehlt der Versuch, auch noch unbekannte Gefahren (mit bisher noch unbekanntem Wirkungsmodellen) möglichst zu vermeiden bzw. gering zu halten. Dies ist ein wesentlicher Grund dafür, warum die zwischen den Zielen und den Tragekapazitäten angesiedelte Ebene der vorsorgeorientierten Kriterien so wichtig ist. Die Orientierung auf Tragekapazitäten und Langfristigkeit im defensiven Nachhaltigkeitsverständnis verleiht der Notwendigkeit zur umfassenden Operationalisierung des Vorsorgeprinzips ein besonders hohes Gewicht.

3.2.4 Vorsorgeorientierte Kriterien

Ein entscheidender Ansatz zur Vorsorge gegen noch unbekannte Gefahren (mit noch unbekanntem Wirkungsmodell) ist größtmögliche ‚Behutsamkeit‘ bei Schritten bzw. Eingriffen. Wenn wir noch unbekanntes Terrain betreten, sollten wir nicht gleich mit der größten möglichen Schrittweite losstürmen, sondern uns behutsam vorantasten. Eine Möglichkeit zur umfassenden Operationalisierung des Vorsorgeprinzips ist somit die Blickwende von der potentiellen Wirkung eines Eingriffs zum Bewirkenden, zum Eingriff selbst. Wenn es gelingt, die Schrittweiten zu bestimmen, wenn es gelingt, das Bewirkende, also dasjenige was auf die Systeme zukommt (den Eingriff, den Stoff, die Technik), zu bewerten, hinsichtlich seiner Reichweite, also der Länge der möglicherweise von ihm ausgehenden Wirkungsketten in Raum und Zeit, dann lässt sich auch das Vorsorgeprinzip umfassend operationalisieren, ohne dass schon hinreichend Kenntnisse vorliegen müssen, was derartige Eingriff genau im einzelnen bewirken werden. Dann ließe sich schon von vornherein etwas aussagen über die Lücke zwischen der Reichweite unserer Handlungen und der Reichweite unseres Wissens über mögliche Folgen, in der sich die noch unbekanntem Gefahren verbergen¹⁵.

Mit Hilfe der auf dieser Ebene angesiedelten vorsorgeorientierten Kriterien soll also das Ausmaß des Nicht-Wissens über mögliche Wirkungen, soll zumindest die Dimension des gesamten Gefahrenpotentials abgeschätzt werden können, bevor z. B. bestimmte Stoffe im großen Stil im ökotoxikologischen ‚Großlabor Erde‘ getestet werden¹⁶. Das massive Freisetzen von Substanzen, wie den FCKWs, die sowohl persistent als auch synthetisch (naturfremd) und mobil sind, stellte in dieser Hinsicht z. B. einen besonders weit reichenden Schritt dar. Bei diesen Substanzen mussten wir damit rechnen, dass sie sich auf dem ganzen Globus ausbreiten. Es war damit auch wahrscheinlicher, dass sie dabei irgendwo (und sei es in 10.000 m Höhe) Wirkungen entfalten, die wir uns bis dahin noch nicht vorstellen konnten. Ähnliches gilt auch für die bei vielen Schwermetallen anzutreffende

¹⁵ Vgl. von Gleich 1998/1999

¹⁶ vgl. Dieter 1984

Eigenschaftskombination von Persistenz und Bioakkumulation. Sie wird als Folge einer starken Erhöhung der technisch-wirtschaftlich bedingten Umsätze dieser Schwermetalle mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Erhöhung von Schwermetallkonzentrationen in den Umweltmedien und in den Organismen führen.

Es geht bei der Operationalisierung des Vorsorgeprinzips also um die ‚Charakterisierung‘ von Eingriffen in Systeme und damit um Technikbewertung mit Hilfe von Technik- bzw. Prozessbewertungskriterien. Zur Operationalisierung des Vorsorgeprinzips werden hier vor allem drei Kriterien vorgeschlagen: 1. die ‚Entropieproduktion als Maß für den Verbrauch von Ressourcen, 2. die ‚Eingriffstiefe‘, als Operationalisierung des Gegenteils von Behutsamkeit und ‚Fehlerfreundlichkeit‘ und 3. die ‚Konsistenz‘ als Beschreibung des Versuchs, einer quantitativen und qualitativen Einbettung des technisch-anthropogenen in den natürlichen Stoffwechsel.

Bevor wir uns diesen Kriterien näher zuwenden, soll allerdings noch kurz auf einen Satz von Kriterien eingegangen werden, der auf der Basis sehr allgemeiner systemtheoretischer Überlegungen entwickelt wurde.

Auch bei diesen **Kriterien, die sich an den allgemeinen Anforderungen an überlebensfähige Systeme orientieren**, ist der Ansatz ein defensiver. Es geht nicht um das Wünschbare, sondern um das Notwendige. Was brauchen Systeme als Mindestausstattung zum Überleben in dynamischer Umgebung? Dieser Frage hat sich u. a. H. Bossel gestellt. Er hat zur Beurteilung der (Nicht)Nachhaltigkeit von Systemen, auf der Grundlage systemtheoretischer Betrachtungen, den Aufbau und die Anwendung von Leitwerten und Indikatoren beschrieben. Er hat versucht, diejenigen Voraussetzungen (und Fähigkeiten) herauszuarbeiten, die jedes System gewährleisten bzw. entwickeln muss, wenn es in dynamischer Umgebung überleben und entwicklungsfähig bleiben, also ggf. auch in der Lage sein will, selbst gesetzte Ziele zu erreichen. Er formulierte neun ‚Leitwerte‘: Umweltkompatibilität, Wirksamkeit, Handlungsfreiheit, Sicherheit, Wandlungsfähigkeit, Koexistenz, Reproduktionsfähigkeit, psychologische Anforderungen und Verantwortung¹⁷.

Eine besondere Schwierigkeit lag auch bei diesem Ansatz darin, einerseits ‚alles‘ erfassen zu wollen und andererseits keine Redundanzen aufzubauen. Ausgehend vom Gesamtsystem der Erde wurden mehrere Untersysteme definiert. Jedes muss dabei für die nächst höhere Ebene einen nachhaltigen Beitrag leisten. Stabilität wird als ‚Lebensfähigkeit in dynamischer Umgebung‘ verstanden, was deutlich macht, dass es für die in Frage stehenden Systeme auch keinen Stillstand, kein statisches, sondern allenfalls ein dynamisches, ein Fließgleichgewicht geben kann. Nachhaltigkeit wird mit ‚Lebensfähigkeit der miteinander korrespondierenden bzw. verflochtenen Teilsysteme‘ gleichgesetzt. Befinden sich Systeme – z. B. auf höchster Abstraktionsebene die ‚natürliche Umwelt‘, die ‚Anthroposphäre‘ und die ‚Biosphäre‘ – im dynamischen Fließgleichgewicht, mit entsprechenden Fähigkeiten zum Ausgleich von ‚Störungen‘ (resilience), so kann das Gesamtsystem als ‚nachhaltig‘ bezeichnet werden.

Im Zentrum der von ihm so genannten ‚Orientoretheorie‘ stehen somit die ‚Leitwerte‘, bei denen es sich insbesondere um Fähigkeiten zur Existenzsicherung handelt, um die dafür nötigen Freiheitsgrade, um Reaktions-, Gestaltungs- und Entwicklungsfähigkeiten (ebd.)

Mit den **vorsorgeorientierte Technik- und Stoffbewertungskriterien** soll versucht werden, dem Vorsorgeprinzip umfassend Geltung zu verschaffen. Das erste Kriterium aus dieser Gruppe, die ‚**Entropieproduktion**‘ stellt mit dem damit verbundenen Ziel der ‚entropischen Effizienz‘ und der ‚ökologischen Amortisierung‘ den Versuch dar, das vom Vorsorgeprinzip getragene Minimierungsgebot angemessen zu operationalisieren. Richtig am Minimierungsgebot ist, dass ein ‚Weniger‘ an Stoff- und Energieströmen im Prinzip auch ein ‚Weniger‘ an Umweltbelastungen und Gefährdungen bedeutet, aber eben nur im Prinzip. Die Sachlage ist wesentlich komplizierter, eine Minimierung nach dem Rasenmäherprinzip ist oft nicht sachgerecht. Es reicht nicht aus, nur die Stoff- und Energieströme zu betrachten, wichtig im Sinne der Nachhaltigkeit ist v. a. die mit ihnen verbundene Entropieproduktion,

¹⁷ Vgl. Bossel 1999 aber auch schon Müller-Reißmann/Bossel 1979 und 1987

also nicht nur die auf den ‚Durchfluss‘ bezogene Effizienz, sondern insbesondere die auf den ‚Verbrauch‘ bezogene ‚entropische Effizienz‘ von Prozessen und Produkten¹⁸.

Mit dem zweiten Kriterium, der ‚**Eingriffstiefe**‘, wird versucht, das Vorsorgeprinzip im Sinne der oben diskutierten ‚Charakterisierung des Eingriffs‘ zu operationalisieren. Im Zentrum stehen dabei nicht nur die schon erwähnten Qualitäten (und Quantitäten) von Stoff- und Energieströmen mit ihren weitreichenden Wirkungen (bei Stoffen z. B. die erwähnte Kombination von Persistenz, Bioakkumulierbarkeit und Mobilität), sondern ganz allgemein die Qualitäten struktureller Eingriffe in Systeme und die daraus erwartbaren Längen der Wirkungsketten in Raum und Zeit. Sehr weitreichende Wirkungen führen damit zu einer extremen Inkongruenz zwischen der Reichweite unserer Handlungen und der Reichweite unseres Wissens über mögliche Folgen¹⁹.

Auch das dritte Kriterium, die ‚**Konsistenz**‘ setzt an der Art und Weise des Umgangs mit Systemen bzw. mit der Natur an. Das Kriterium wurde bisher vor allem nach der ökologischen Seite hin entwickelt. Es dient der Orientierung beim Versuch einer quantitativen und qualitativen Einbettung des technisch-anthropogenen in den natürlichen Stoffwechsel, bzw. bei der Suche nach einer (ökologisch) ‚angepassten‘ - bzw. noch weiter gehend - nach einer ‚naturgemäßen‘ Technik. Es stellt den Versuch dar, die Suche nach einer ‚ökologischen Technik nach dem Vorbild der Natur‘ mit Hilfe eines (eher leitbildartigen) Kriteriums zu operationalisieren²⁰.

Somit stellt die Eingriffstiefe eher Bezüge zu den an Tragekapazitäten orientierten Kriterien her, während das Kriterium Konsistenz einen stärkeren Bezug hat zu den (ökologischen und sozio-ökonomischen) Zieldimensionen. Allen drei Kriterien kommt für alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit eine hohe Relevanz zu, denn das Ausmaß der Entropieproduktion ist nicht nur ein ‚ökologisches‘, sondern genauso sehr ein ökonomisches Problem und ein Problem der intergenerationellen Gerechtigkeit. Auch bei Umweltrisiken und technischen Großrisiken werden im Ernstfall großflächig und irreversibel sowohl ökologische, als auch ökonomische und soziale Systeme verwüstet. Und schließlich ist auch die Frage der ‚Angepasstheit‘ von Technik genauso sehr eine sozial-ökonomische wie eine ökologische Frage.

3.3 Nachhaltigkeitsbewertung

Es wurde eingangs darauf hingewiesen, dass Kriterien in der Regel im Rahmen von Bewertungsverfahren und Bewertungsmethoden zum Tragen kommen. Hinsichtlich des ganzen Feldes von Bewertungsverfahren, -methoden, -kriterien, Indikatoren und des praktikablen Umgangs mit ihnen ist noch einiges an Arbeit zu leisten. Einige ökologische und ökonomische Bewertungsmethoden sind z. B. schon vergleichsweise ausgearbeitet, aber in der sozialen Dimension ist noch sehr Vieles offen. Wichtige, praktikable und etablierte Bewertungsmethoden sind die Kosten-Nutzen-Analyse (erweitert um die bisher vernachlässigten externen Kosten), die (öko)toxikologische Analyse, die Risikoanalyse und die Ökobilanz. Einige Methoden wie die (öko)toxikologische Analyse, die Risikoanalyse und die Ökobilanz sind international schon weitgehend standardisiert und normiert. Die (öko)toxikologische Analyse, die Risikoanalyse und die erweiterte Kosten-Nutzen-Analyse erfassen zudem Aspekte aus allen drei Nachhaltigkeitsdimensionen. Keine dieser Methoden ist aber für sich allein aussagekräftig genug mit Blick auf das Nachhaltigkeitsziel. Eine Nachhaltigkeitsbewertung muss in der Regel auf einen Methodenmix zurückgreifen. Die Bewertung der Richtung und der Ergebnisse von Nachhaltigkeitsprojekten vollzieht sich damit in einem mehrfachen iterativen Wechsel der Betrachtungs- bzw. Bewertungsperspektive.

¹⁸ Hierauf wird in Kapitel 3.3 noch näher eingegangen.

¹⁹ Näheres in von Gleich 1998/99

²⁰ vgl. Näheres in Kapitel 4.3 und in von Gleich 1998, 2001

3.3.1 Möglichkeiten und Grenzen der Ökobilanz

Wenn es – wie im Projekt Nachhaltige Metallwirtschaft – um Stoffe und Stoffströme geht, ist meist die Ökobilanz die dominierende Methode. Die Ökobilanz ist weitgehend normiert und standardisiert, und sie umgreift immerhin den gesamten Produktlebenszyklus. Insbesondere durch die Erstellung von Sachbilanzen wird wichtige Aufklärungsarbeit geleistet über den Verlauf von Stoff- und Energieströmen. Die Ökobilanz fokussiert allerdings nur auf die ökologischen Wirkungen. Als alleinige oder auch nur als Hauptbewertungsmethode im Rahmen von Nachhaltigkeitsstrategien ist sie völlig überfordert, auch schon mit Blick allein auf Stoffströme.

Der Ökobilanz fehlt insbesondere:

- ein Ansatz zur Integration des Vorsorgeprinzips;
- ein absolutes Maß für Effizienz (Wirkungsgrad);
- ein Maß für die ‚Hochwertigkeit‘ von Recyclingprozessen (gefordert z. B. im deutschen Kreislaufwirtschafts- und Abfall Gesetz);
- ein Maß für den Ressourcenverbrauch, genauer für die Qualität der Ressourcen bzw. den Grad der Ressourcenentwertung (Entropieproduktion) im Sinne des Verlusts an Gebrauchstauglichkeit.

Unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten geht es zum einen um den Aufwand, den wir treiben, wenn wir unsere Bedürfnisse befriedigen wollen. Der Umweltaufwand wird heute vorwiegend mit Hilfe von Ökobilanzen zu erfassen versucht. Der absolute Durchsatz an Stoffen und Energien, der mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes oder einer Dienstleistung verbunden ist, kann schon recht viel aussagen über die damit möglicherweise verbundenen Umweltbelastungen. Es wäre für eine Bewertung von Materialien, Produkten und Prozessen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten aber hilfreich, wenn wir über diese einfache buchhalterische Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen hinausgehen könnten und zwar insbesondere hinsichtlich folgender vier Aspekte:

- Ökobilanzen bieten bisher wenig Ansatzpunkte für die Integration des Vorsorgeprinzips. Eine – derzeit heftig umstrittene – Möglichkeit bestünde in der Formulierung eines ‚prinzipiellen Minimierungsgebots‘, also im Versuch, den Umfang der mit dem jeweiligen Produkt bzw. Stoff verbundenen Energie- und Stoffflüsse prinzipiell so weit wie möglich herunterzuschrauben. Ein solches ‚Sparen nach dem Rasenmäherprinzip‘ wird aber der Problematik vielfach nicht gerecht. Mit Blick auf mögliche Umweltwirkungen macht es nämlich einen großen Unterschied aus, ob x Tonnen Kies oder x Tonnen Klärschlamm bzw. x Kilojoule Energie aus regenerativen oder aus fossilen Energiequellen eingespart werden können. Auch die Liste der im Rahmen der Wirkungsbilanz betrachteten ökologischen Wirkungen ist stark emissionsfixiert und alles andere als vollständig. Es stellt sich die berechtigte Frage, um wie viele Positionen wir diese ‚Liste der bisherigen schlechten Erfahrungen‘ in den kommenden Jahrzehnten wohl erweitern müssen. Die Orientierung an Tragekapazitäten bietet, wie erwähnt, einen gewissen Fortschritt in Richtung Vorsorgeprinzip wenigstens mit Blick auf schon bekannte Wirkungsmodelle. Mit der angestrebten ‚entropischen Bilanzierung‘ wäre es vielleicht möglich, die Intentionen des allgemeinen Minimierungsgebots‘ mit dem Tragekapazitätsansatz zu verbinden, nämlich dann, wenn es gelänge, zumindest die Größenordnung der globalen Entropieproduktion einerseits und die Größenordnung der ‚entropischen Entsorgungskapazität des Systems Erde‘ andererseits zu bestimmen²¹.

²¹ Beim energetischen Aspekt der ‚Entropieerzeugung ist dies durchaus heute schon möglich. Die einzige Möglichkeit der Erde ‚Entropie‘ zu entsorgen bezieht sich ja auch auf den energetischen Aspekt der Entropie. Hier geht es ‚nur‘ um die Wärmeabstrahlung der Erde. Für die Entsorgung der stofflichen Entropie (Dissipation) gibt es nichts Vergleichbares. Das System Erde könnte sich allerdings dann einigermaßen im ‚Gleichgewicht‘ befinden, wenn sich die insbesondere durch die Sonne (Exergie) angetriebene globale stoffliche Entropieminderung mit der durch die Menschheit

- Bisher geht sowohl die Qualität der Ressourcen (bzw. der Qualitätsverlust) als auch die Endlichkeit von Ressourcen nur unzureichend in die Ökobilanzen ein. Es macht aber einen großen Unterschied, ob nachwachsende oder nicht regenerierbare Stoffe bzw. ob Energie aus regenerativen oder fossilen Quellen ‚verbraucht‘ wird. Gerade der unwiederbringliche Verlust nicht regenerierbarer Ressourcen ist für eine nachhaltigkeitsorientierte Bewertung von großer Bedeutung.
- Bisher behandelt die Input-Output-Bilanzierung der Ökobilanz die Stoff- und Energieumwandlungsprozesse (ja fast den gesamten Umgang mit den Stoffen und Energien in der Technosphäre) als Black Box. Dies hat enorme Folgen für daraus sich ergebende Handlungsoptionen, da dadurch das Hauptaugenmerk auf die Schnittstellen zwischen Ökosphäre und Technosphäre gelegt wird. Es spricht allerdings sehr viel dafür, dass sich an diesen Schnittstellen zwar die ökologischen Probleme äußern, dass dort aber nicht die wichtigsten Ansatzpunkte für die ‚Lösung‘ dieser Probleme liegen. Ansatzpunkte für die Lösung liegen weniger in einer ‚end-of-the-pipe-orientierten Abfall- und Emissionspolitik und auch weniger in der Ressourcenpolitik oder – Ökonomie. Die ‚Lösung‘ liegt zum größten Teil *innerhalb* der ‚Black-Box‘, also beim ‚Umgang mit den Stoffen in der Technosphäre‘. Es wäre für eine nachhaltigkeitsorientierte Bewertung von Innovationen also von größtem Interesse nicht nur Energie-, sondern auch Stoffwandlungsprozesse nach ihrem ‚Wirkungsgrad‘ beurteilen zu können. Im Energiebereich ist uns das seit den Arbeiten von Carnot möglich. Auf der Basis seiner Arbeiten kann man den aktuellen ‚Wirkungsgrad‘ von z. B. Kraftwerken vergleichen mit dem ‚idealen Carnot-Prozess‘. Damit können Effizienzgewinne bewertet und vor allem auch noch unausgeschöpfte Effizienzpotentiale ziemlich klar benannt werden. Etwas Vergleichbares gibt es für Stoffumwandlungsprozesse bisher leider noch nicht. Auch hier könnte die Entropiebilanz den ersten Schritt in diese Richtung darstellen. Der entropische Wirkungsgrad von Stoffwandlungsprozessen könnte uns Aufschluss geben, über Prozesse mit der bestmöglichen Ausnutzung des in die Prozesse eingehenden Ordnungsniveaus und über diejenigen Prozesse mit der geringsten Entropieproduktion.
- Schließlich wäre es interessant, die Entropieproduktion und damit einen wichtigen Aspekt des Umweltbelastungspotentials, das mit Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen verbunden ist, ins Verhältnis zu ihrem Nutzen (und ggf. ihrem Umweltentlastungspotential) setzen zu können. Denn auch dies ist für eine Gesamtbewertung von größter Wichtigkeit. Es kann ja durchaus sein, dass ein Mehreinsatz an Stoffen und Energien an einer Stelle im Produktlebenszyklus, sich an anderer Stelle um ein mehrfaches auszahlt²². Das wäre dann ein Vorgang, den wir als ‚tendenzielle ökologische (bzw. nachhaltigkeitsorientierte) Amortisation‘ bezeichnen.

Um zumindest einige dieser Mängel zu überwinden, wurde im Zusammenhang mit dem Projekt ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ die Entwicklung der Entropiebilanzierung als Ergänzung zur Ökobilanz voran getrieben. Zu den interessanten Aspekten einer Entropiebilanz gehört dabei ohne Zweifel die Brückenfunktion, die der Entropiebegriff zwischen der naturwissenschaftlich-physikalischen Sichtweise einerseits und der ökonomischen Sichtweise andererseits spielen kann. Die Erweiterung der Ökobilanz um die Entropiebilanzierung kommt somit einer Öffnung dieser Bewertungsmethode in Richtung auf die ökonomisch-soziale Nachhaltigkeitsdimension gleich, indem sie den ökonomisch-sozialen Begriff des ‚Verbrauchs‘ naturwissenschaftlich-physikalisch zu fassen versucht.

3.3.2 Entropiebilanzen als Ergänzung zur Ökobilanz

Physikalisch gesehen können Energien und Stoffe nicht vernichtet werden. Es gelten die Erhaltungssätze, mit deren Hilfe auch schon in der Ökobilanz viele Bilanzlücken geschlossen

verursachten globalen stofflichen Entropieerzeugung (Dissipation) so ungefähr die Waage halten würden.

²² Auch dies ist ein Hinweis darauf, dass das allgemeine ‚Minimierungsgebot‘ zu grob ist.

werden. Alles was in ein System eintritt, muss auch irgendwo bleiben. Entweder es akkumuliert sich im System, oder es tritt an irgendwelchen Stellen wieder aus. Wörtlich genommen könnte es mit der Geltung der physikalischen Erhaltungssätze für Energie und Materie keine Nachhaltigkeitsprobleme im Sinne eines Verbrauchs geben. Doch hier kommt der ‚qualitative‘ Aspekt des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik mit der entropischen Betrachtung zum Zuge. Energien und Stoffe können zwar nicht vernichtet, sie können aber sehr wohl in ihrer Nutzbarkeit vermindert oder gar ruiniert werden. Zustände höherer Ordnung, höherer Energiedichte und höherer Stoffkonzentrationen, bzw. ganz allgemein Zustände fern vom thermodynamischen Gleichgewicht sind für uns Lebensgrundlagen und Ressourcen. Wenn wir diese im Zuge der geologischen und biologischen Evolution geschaffenen ‚Gradienten‘ als ‚Erbe der Menschheit‘ betrachten, dann gehört ihre Entwertung als Entropieproduktion zu den zentralen Problemen und Bewertungsansätzen jedes nachhaltigkeitsorientierten Stoffstrommanagements.

Es geht um die Qualitätsveränderungen, denen die Energien und Stoffe bei ihrem Durchgang durch die Technosphäre unterliegen. Verbrauch bedeutet ökonomisch und technisch eine Verminderung der Nutzbarkeit. Für viele Aspekte, die wir umgangssprachlich mit dem Terminus Verbrauch belegen, kann erfolgreich der zweite Hauptsatz der Thermodynamik herangezogen werden. Mit ihm wird die Unumkehrbarkeit und Gerichtetheit bestimmter physikalischer Prozesse beschrieben²³. Verbrauch im Sinne einer Verminderung von Nutzbarkeit kann damit zumindest zum Teil mit Hilfe einer physikalischen Größe gemessen werden: als Produktion von Entropie²⁴.

Ein wesentlicher Beitrag hierzu wurde im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ im Rahmen einer Dissertation erbracht. Am Beispiel der Kupferproduktion bei der Norddeutschen Affinerie (einschließlich eines durchgerechneten Recyclingweges für Kupfer in diesem Werk) konnte gezeigt werden, dass die Ergänzung von Ökobilanzen um Entropiebilanzen zwar aufwändig aber durchaus durchführbar ist²⁵. Da es sich bei der Herstellung von Kupfer für Leitungszwecke um einen Prozess der Reinigung und Aufkonzentration handelt (vom Kupfererz mit einer Kupferkonzentration von ca. 1,5 % über das ca. 30%ige Konzentrat bis zum 99.999 %ig reinen Kupferdraht), konnten auf diese Weise die Beiträge der einzelnen Verarbeitungsschritte für diesen Reinigungsprozess ins Verhältnis gesetzt werden zu der damit jeweils verbundenen Entropieproduktion. Durch diesen Ansatz lassen sich ebenso wie mit der Ökobilanz Effizienzpotentiale im Unternehmen aufspüren, bzw. Schwachstellen des gesamten Prozesses identifizieren, nun allerdings nicht nur im Hinblick auf den Durchfluss, sondern auch im Hinblick auf die damit verbundene Entwertung von Energien und Stoffen. Weiter reichende Aussagen werden allerdings erst in Zukunft möglich sein, wenn zusätzlich konkurrierende (z. B. biologische) Verfahren der Aufkonzentration von Kupfer bilanziert und zu den metallurgischen Verfahren ins Verhältnis

²³ Gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik werden technisch nutzbare Temperaturdifferenzen (Exergie) in technischen und natürlichen Prozessen unumkehrbar ausgeglichen. Das bedeutet, es wird Entropie erzeugt. Die Gesamtenergie bleibt dabei durchaus erhalten, aber mit dem Wegfall der Differenz schwindet auch deren technische Nutzbarkeit. Der zweite Hauptsatz lautet in der Formulierung von Kelvin: „Es gibt keinen periodischen thermodynamischen Prozess, der keine andere Wirkung hat, als aus einem Reservoir Wärme abzuziehen und in mechanische Arbeit umzuwandeln“. Bei der Betrachtung der Veränderungen von Stoffqualitäten spielen allerdings nicht Temperaturdifferenzen die zentrale Rolle, sondern chemische Potentiale sowie die ‚Reinheit‘ von Stoffen. Die Entropieerzeugung besteht dann im Abbau dieser Potentiale bzw. in der Vermischung bzw. Verunreinigung von Stoffen (Mischungsentropie).

²⁴ Innerhalb dieses hier nur kurz angerissenen Ansatzes sind allerdings noch eine ganze Reihe von theoretischen und praktischen Problemen zu lösen, z. B. hinsichtlich der Bewertung von Legierungen, bei denen die Legierungselemente einerseits die Nutzbarkeit der Legierung im Vergleich zum reinen Metall in der Nutzungsphase deutlich erhöhen. Gleichzeitig erschweren sie aber nach der Nutzungsphase die Recyclingmöglichkeiten, weil dann jegliche weitere Vermischungen mit anderen Legierungen streng (und aufwendig!) vermieden werden müssen. Nur identische Legierungen können dann noch zusammen hochwertig recycelt werden.

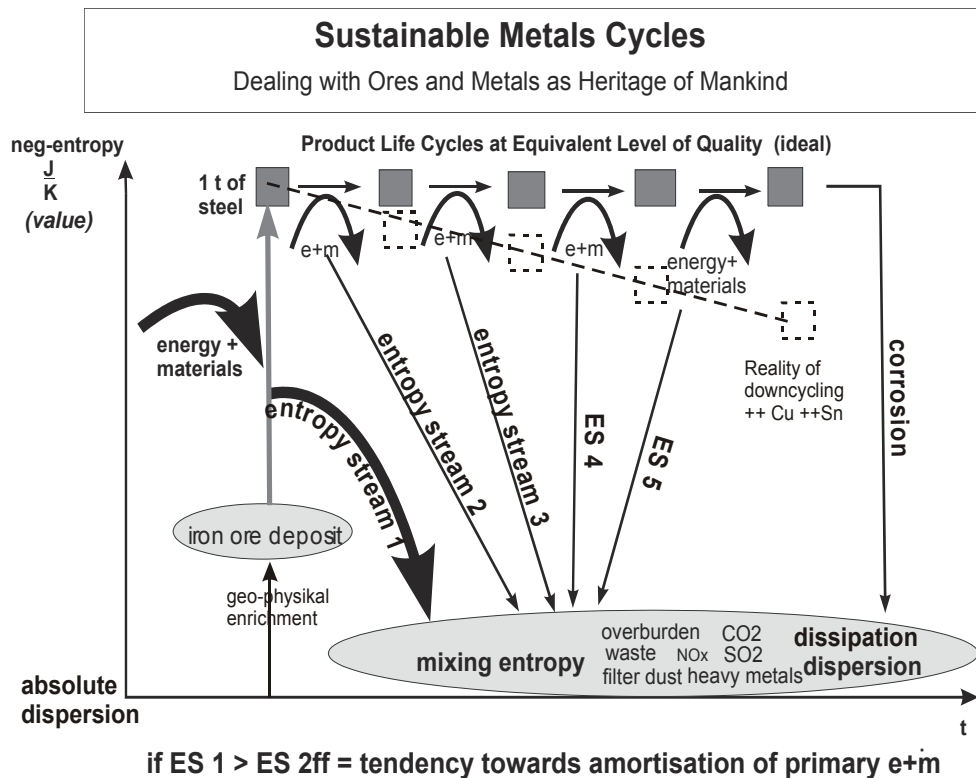
²⁵ Vgl. die Zusammenfassung der Ergebnisse in Kapitel 7 sowie Gößling-Reisemann 2001

gesetzt werden können.

Der Schritt von der Durchflussbetrachtung zur Verbrauchsbetrachtung - also zum Verlust von Stoffqualitäten - ist aber nicht nur bei der *Herstellung* von Metallen von Bedeutung. Strategisch wichtiger ist er für die Betrachtung des *Umgangs mit Metallen in der Technosphäre* und insbesondere für die Bewertung der *Qualität von Recyclingprozessen*. Im Deutschen Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz ist z. B. immer wieder von einem Recycling ‚auf hohem Niveau‘ bzw. von ‚hochwertigem‘ Recycling die Rede. Ein Maß konnte dafür aber bisher noch nicht angegeben werden. Derzeit bestimmen noch die ökonomischen Konnotationen – also der Marktwert - das Bild. Die ökonomische Bewertung von Recyclingprozessen krankt daran, dass hinsichtlich der Ressourcenschonung noch eine völlig ungebremschte Verschiebung (Externalisierung) der zukünftig steigenden Kosten von knapper werdenden bzw. zur Neige gehenden Ressourcen auf zukünftige Generationen vorherrscht. Ein ‚Verlust an Nutzbarkeit‘ muss deshalb auf andere Weise gemessen werden, eben mit Hilfe des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, als Entropieproduktion.

Der dabei verfolgte Grundansatz soll anhand der Abbildung 1 erläutert werden. Das Basisniveau in der Grafik entspricht den Zuständen maximaler Entropie. Wenn es keine Konzentrationsgradienten auf der Erde und in der Erdkruste gäbe, wenn alle Metallionen gleichmäßig statistisch in der Erdkruste verteilt wären, könnten und müssten wir sozusagen überall nach Metallen graben. Dies ist zum Glück nicht der Fall. Die Natur hat vorgearbeitet. D. h. wir können die Produktion von einer Tonne Stahl auf dem Konzentrationsniveau von Lagerstätten mit durchschnittlich über 50% Eisengehalt im Erz beginnen. Wir müssen dann Energie und Stoffe einsetzen, um das Erz zu gewinnen und daraus Stahl zu produzieren. Wir produzieren dabei aber nicht nur Stahl, sondern auch damit untrennbar verbunden Entropie, in der Grafik dargestellt als Entropiestrom 1. Wenn wir die so erzeugte Tonne Stahl anschließend, z. B. ohne Korrosionsschutz, in korrosiver Umgebung einsetzen würden (z. B. im Meerwasser), würde in kurzer Zeit das gewonnene Ordnungsniveau völlig dissipiert werden in Richtung auf die schon erwähnte statistische Gleichverteilung im Meerwasser oder in den Sedimenten. Wir hätten dann das Erbe der Menschheit schlicht verschwendet. In der Regel tun wir das nicht, sondern wir sind am Ende des ersten Nutzungszyklus in der Lage, den Stahl zu recyceln. Auch das Recycling erfordert natürlich wieder den Einsatz von Stoffen und Energien, und wir müssen dabei auf jeden Fall auch mit dissipativen Verlusten rechnen. In der Grafik dargestellt als Entropiestrom 2. Ein 90 %iges Stahl-Recycling pro Umlauf wäre sicher schon ein recht gutes Ergebnis, leider liegen die Verluste derzeit wesentlich höher. Wir sind auch weit davon entfernt, das in der Grafik angedeutete ideale Recycling auf gleichem Ordnungsniveau zu realisieren. Durch den Eintrag von Verunreinigungen mit Störelementen, wie z. B. Kupfer oder Zinn, findet, zumindest bei der Verwendung von Altschrotten, ein sich verschärfendes ‚Downcycling‘ im Stahlkreislauf statt, wie es durch die gestrichelte Linie angedeutet wird²⁶.

²⁶ Zum Näheren vgl. Kapitel 8.1



AvG 11/2001

Abbildung 1_ Entropiebilanzen als Bewertungsansatz für den Umgang mit Ressourcen

3.3.3 Entropische Effizienz und Ökologische Amortisierung

Dem Kriterium ‚entropische Effizienz‘ und dem Ziel einer nachhaltigkeitsorientierten Amortisation liegt der Gedanke zugrunde, dass sowohl im abiotischen als auch im biotischen Bereich die natürlich vorfindbaren Ressourcen also z. B. die Konzentration von technisch interessanten Stoffen in Erzlagerstätten oder die Existenz einer Humusschicht, die den Anbau Nachwachsender Rohstoffe ermöglicht, als ‚Geschenke der Natur‘, als ‚Erbe der Menschheit‘ zu betrachten sind, mit dem, nicht zuletzt mit Blick auf die Interessen zukünftiger Generationen, sehr sorgsam umgegangen werden muss²⁷.

Unsere Nutzung der Natur beruht also auf den Ergebnissen (und Wechselwirkungen) der abiotischen, insbesondere kosmologischen und erdgeschichtlichen (Mineralien, Erzlagerstätten, Reliefstruktur, Sonnenenergie, Klima, Wasserhaushalt) und der biotischen Evolution (Organismen mit ihren Stoffen, Strukturen und Leistungen, Biosphäre). Dieses ‚Erbe der Menschheit‘ kann man als ‚thermodynamisch unwahrscheinliche‘ Zustände fern vom Gleichgewicht‘ betrachten, als evolutionär entstandene ‚Ordnungsniveaus‘ (Neg-Entropie). Die thermodynamisch wahrscheinlichere – aber für unsere Nutzungsbedürfnisse katastrophale - Alternative wäre somit ein Zustand der absoluten statistischen Gleichverteilung aller Moleküle im System Erde (z. B. aller Metallionen in der Erdkruste). Möglich geworden ist dieser thermodynamisch unwahrscheinliche Aufbau von Ordnungsniveaus in Form von Erzlagerstätten sowohl durch die atomaren Zerfallsprozesse im Erdinnern, durch Abkühlungsenergie der Erde, durch Wechselwirkungen zwischen Erdkruste und Erdmantel (magmatogene Lagerstättenbildung), durch Schwerkraft und Gesteinsdruck (diagenetische Lagerstättenbildung) und durch den permanenten

²⁷ Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass dies kein ökologisches Problem darstellt. Es handelt sich in erster Linie um ein Gerechtigkeitsproblem, in zweiter Linie um ein (ressourcen)ökonomisches Problem und erst in dritter Linie um ein ‚ökologisches‘ Problem (insbesondere der ‚Entropie-Entsorgung‘).

Energiezufluss der Sonne (Verwitterung und Sedimentbildung)²⁸.

Ein wichtiger Aspekt der Nachhaltigkeitsproblematik liegt nun gerade darin, dass wir diese Ordnungsniveaus ‚vernutzen‘. In ‚geschlossenen Systemen‘ ist dies unvermeidbar (2. Hauptsatz). In diesem Fall kann es nur um eine Verlangsamung dieses Prozesses gehen, also vor allem um die Frage einer möglichst effizienten Nutzung (größtmöglicher Nutzen bei geringst möglicher Entropieproduktion). Nun haben wir es in der Wirklichkeit in den seltensten Fällen mit ‚geschlossenen Systemen‘ zu tun. Insofern ist es interessant darauf hinzuweisen, dass die biologische Evolution und natürliche Ökosysteme es uns vormachen, wie in ‚offenen Systemen‘ Ordnungsniveaus nicht nur sehr effizient vernutzt, sondern insgesamt auch gesteigert werden können (gespeist durch die von der Sonne gelieferte Exergie). Dies wäre natürlich das anzustrebende Vorbild für ‚Nachhaltiges Wirtschaften‘. Wissenschaftlich-technische Ansätze in dieser Richtung eines Wirtschaftens nach dem Vorbild der Energie- und Stoffflüsse in Ökosystemen werden derzeit im Rahmen des Konzeptes ‚Industrial Ecology‘²⁹ verfolgt.

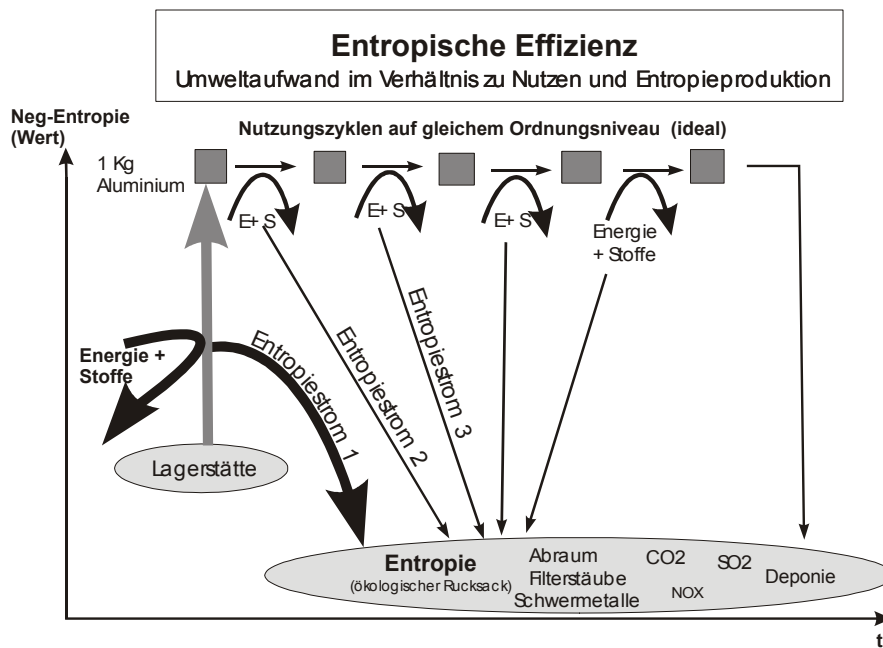
Das Kriterium ‚entropische Effizienz‘ bzw. das Bewertungsverfahren zur Bestimmung einer möglichen ‚nachhaltigkeitsorientierten Amortisierung‘ des Umweltaufwandes für die Herstellung und Nutzung eines Werkstoffes oder eines Produkts kann sehr schön anhand des Beispiels ‚Lebenszyklus des Werkstoffs Aluminium‘ verdeutlicht werden.

Nachdem z. B. in der Vergangenheit gerade der Werkstoff Aluminium im Zentrum einer ökologisch motivierten Kritik gestanden hat, insbesondere wegen dem mit seiner elektrolytischen Herstellung verbundenen extremen ‚ökologischen Aufwand‘, sehen wir in unserem Forschungsprojekt gerade in den Metallen - und eben auch im Werkstoff Aluminium - durchaus interessante Perspektiven im Rahmen von Nachhaltigkeitsstrategien. Genau besehen hat sich die Kritik am Aluminium allerdings immer schon nicht allein am Aufwand, sondern am Aufwand-Nutzen-Verhältnis entzündet, insbesondere dort, wo Aluminium nur relativ kurzfristig und oft auch kaum recycelbar als Verpackungsmaterial eingesetzt wurde.

Unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten interessiert allerdings eben nicht nur der von Ökobilanzen erfasste lebenszyklusbezogene Aufwand für die Herstellung, Nutzung und Recycling von Aluminium, sondern v. a. auch die Endlichkeit der Ressource Bauxit (selbst wenn diese derzeit nicht als dramatisch angesehen wird) und schließlich das Aufwand-Nutzen-Verhältnis über den ganzen Produktlebenszyklus (vgl. Abbildung 2).

²⁸ Vgl. Pohl 1992

²⁹ Vgl. Kapitel 4.3



Tendenzielle ökologische Amortisierung des primären Umweltaufwands:
Wenn Entropiestrom 1 sehr viel größer als Entropiestrome 2f.

AvG 11/99

Abbildung 2_Entropische Effizienz – Das Beispiel Aluminium

Aufgrund der Vorarbeiten der Erdgeschichte, und damit aufgrund der Existenz von Bauxitlagerstätten sind wir nicht gezwungen, den Prozess der Aluminiumherstellung im Zustand statistischer Gleichverteilung aller Aluminiumionen in der Erdkruste (also beim Ordnungsniveau nahe Null) zu beginnen, sondern infolge des Anreicherungs-faktors 4-7³⁰ auf dem vorfindbaren Konzentrationsniveau von 35-55% Aluminiumgehalt im Bauxit. Wir setzen dann Energie (darunter eben sehr viel elektrische) und Stoffe ein und produzieren ein kg reines Aluminium, aber natürlich nicht nur das, sondern wir produzieren gleichzeitig auch einen großen Entropiestrom in den von Schmidt-Bleek so genannten „ökologischen Rucksack“ (Schmidt-Bleek 1994). Er enthält Abraum, Abfall, Abwärme, Emissionen usw.

Von den Folgen dieser Entropieproduktion werden derzeit allenfalls das Schwinden der Ressourcen, die Begrenztheit der Aufnahmekapazität der Atmosphäre für treibhausrelevante Gase, die Fluor-Emissionen und ggf. noch die Rotschlammdeponien bewusst wahrgenommen. Welches der beiden Probleme: die ‚Vernutzung des Erbes der Menschheit‘ auf der Input-Seite oder die damit verbundene Entropieproduktion auf der Output-Seite zuerst globale Dramatik erlangt, ist derzeit noch offen. Einiges spricht allerdings dafür, dass die Entropieaufnahme-kapazität lange vor den verfügbaren Ressourcen ‚erschöpft‘ sein wird. Jedenfalls hängen beide Probleme eng miteinander zusammen. Die Entropieproduktion ist nur die Kehrseite der Medaille unserer Art und Weise der ‚Vernutzung von Ordnungsniveaus‘ (des ‚Erbes der Menschheit‘).

Bauxitvorkommen wird es also auf der Erde noch sehr lange geben. Wenn aber immer magerere Erz-lagerstätten ausgebeutet werden müssen, steigt entsprechend proportional der energetische und materielle Aufwand für die Gewinnung, Aufreinigung und Konzentration von Aluminium und damit auch die Entropieproduktion. Da der Satz der Erhaltung der Materie gilt, wird es somit zwar auch in Zukunft immer Metalle in Sedimenten geben. Die Endlichkeit einer metallischen Ressource meint dann ‚nur‘ denjenigen Zustand, bei dem der für ihre Gewinnung zu betreibende Aufwand jedes ökonomisch und ökologisch sinnvolle

³⁰ Es handelt sich um Verwitterungslagerstätten. Der Anreicherungs-faktor für Bauxit ist im Übrigen einer der kleinsten, weil Aluminium mit 8% Anteil den dritthäufigste Grundstoff der Erdkruste darstellt. Andere Anreicherungs-faktoren liegen erheblich höher z. B. bei: Eisenerzen ca. Faktor 10, Kupfererzen ca. Faktor 80 und bei Goldlagerstätten ca. Faktor 500 (vgl. Tabelle 2).

Ausmaß und die dabei erzeugte Entropie die Aufnahmekapazität des Systems Erde als ganzes übersteigt.

Das Unvernünftigste, was wir nun auch mit diesem erzeugten Aluminium tun könnten, wäre, es Korrosion (z. B. im Verbund verschiedener Metalle) auszusetzen, mit der Folge, dass über kurz oder lang tatsächlich in eine fast statistische Gleichverteilung der Metallionen dissipieren würde. Wir sollten das Material vielmehr so geschickt einsetzen, dass es erstens im Leichtbau Energie sparen hilft, und dass es zweitens im Rahmen langlebigen und reparierbaren Produkte mehrmals wieder verwendbar und dann - wenn dies nicht mehr geht - als Material mehrmals auf gleichem Ordnungsniveau wiederverwertet wird (vgl. Abbildung 2)³¹.

Auch diese Nutzungs- und Recyclingprozesse sind entropisch gesehen natürlich nicht ‚umsonst‘ zu haben. D. h. mit jedem Wiederverwendungs- und Wiederverwertungsprozess ist ein zusätzlicher Aufwand an Energie und Stoffen nötig, der wiederum den Entropiegehalt des ‚ökologischen Rucksacks‘ vergrößert. Wenn allerdings der Aufwand für die Wiederverwendung und Wiederverwertung wesentlich kleiner ist, als derjenige für die Primärproduktion (was beim Aluminium mit Blick auf den Energieverbrauch ca. um den Faktor 10 der Fall ist!), dann wird zwar der Entropiegehalt des ökologischen Rucksacks mit jedem Recyclingumlauf absolut größer, bezogen auf die einzelne Nutzeneinheit wird er dagegen mit jedem neuen Recyclingdurchlauf tendenziell kleiner. Das ist es, was hier als tendenzielle ökologische Amortisierung bezeichnet werden soll.

Definitive Nachhaltigkeit ist also bei der Nutzung nicht-regenerierbarer Rohstoffe nicht zu erreichen, allenfalls eine ‚Streckung‘ des Verbrauchs. Auf diese sollten wir uns konzentrieren. Es geht also um dreierlei: 1. eine hohe Ressourcenproduktivität (möglichst hoher gesellschaftlicher Nutzen pro umgesetzter Tonne Metall), 2. ein effektives Recycling mit möglichst wenig dissipativen Verlusten und 3. die Vermeidung von qualitativen Entwertungen (z. B. durch Verunreinigungen). Ein anstrebenswertes Ziel ist auf jeden Fall eine ‚tendenzielle ökologische Amortisierung‘ des Primäraufwands für die Metallerzeugung im Laufe der Nutzungsphase³².

Im Prinzip geht es also darum, die Entropieproduktion ins Verhältnis zu setzen zum damit verbundenen ‚gesellschaftlichen Nutzen‘. Das ist alles andere als einfach, erstens weil die Entropiebilanz schon bei der Bilanzierung mehr Daten erfordert als die Ökobilanz³³, und weil zweitens mit dem Ziel der ‚ökologischen Amortisierung‘ versucht wird, eine Brücke von naturwissenschaftlichen Fakten zur sozial-ökologischen Frage des gesellschaftlichen

³¹ Von einem solchen Ziel sind wir allerdings noch weit entfernt. Derzeit wird eine echte Wiederverwertung von Werkstoffen auf gleichem Ordnungsniveau (ohne Verdünnung von Problemstoffen aus den Altstoffen in Frischware) mit Ausnahme der Edelmetalle und Kupfer in **keinem** der großen Werkstoffbereiche praktiziert, nicht bei den Massenmetallen und schon gar nicht bei den Kunststoffen. Recycling-Aluminium ist z. B. mit Kupfer und Eisen belastet (Recyclingstahl mit Kupfer und Zinn), Stoffe, die nicht so ohne weiteres wieder entfernt werden können. Beide Recyclingmetalle können (ohne Verdünnung mit Neuware) nur noch in bestimmten Legierungen eingesetzt werden. Ein Vorgang, den man durchaus als down-cycling bezeichnen kann.

³² Eine Amortisierung im Sinne einer Vermehrung durch Verzinsung wie im Bereich des Geldes, ist hier natürlich unmöglich. Man kann und sollte aber durchaus viel weiter gehende Ziele ins Auge fassen. Die biologische Evolution und natürliche Ökosysteme machen es uns vor, wie in ‚offenen Systemen‘ Ordnungsniveaus nicht nur äußerst effizient genutzt und ‚verbraucht‘ werden (z. B. auch in Form von Nutzungskaskaden), sondern wie Ordnungsniveaus auch erhalten und kontinuierlich aufgebaut und gesteigert werden können. Die gesamte biologische Evolution von Organismen und Ökosystemen zeigt, wie Ordnungsniveaus insgesamt auch gesteigert werden können (gespeist natürlich durch die von der Sonne gelieferte Exergie). Dies wäre das eigentlich anzustrebende Vorbild für ‚Nachhaltiges Wirtschaften‘. Wissenschaftlich-technische Ansätze in dieser Richtung eines ‚Wirtschaftens nach dem Vorbild der Energie- und Stoffflüsse in Ökosystemen‘ werden derzeit im Rahmen des Konzepts ‚Industrial Ecology‘ verfolgt, vgl. Kapitel 4.3

³³ Insbesondere auch Temperaturniveaus und die chemische Form (z. B. Bindungsart) in der die Stoffe vorliegen.

Nutzens zu schlagen.

Auch wenn damit allenfalls ein Anfang gemacht wurde, könnte dies doch den Beginn einer Entwicklung markieren, in deren Verlauf die bisher vorherrschenden rein quantitativen Modelle regionaler, nationaler und globaler (Metall-)Stoffströme zunehmend um (ebenfalls quantifizierbare) Aspekte der dabei kreisenden Stoff*qualitäten* ergänzt werden. Wesentliche Vorteile der Ergänzung der Ökobilanzen um Entropiebilanzen sind somit erstens der Brückenschlag zwischen dem physikalischen und ökonomischen Verständnis von Ressourcenverbrauch, zweitens die Einführung eines Maßes für Ressourceneffizienz (nach dem Vorbild des Wirkungsgrads von Energiewandlungsprozessen), drittens eines physikalischen Maßes für die Qualität von Recyclingprozessen und schließlich die Hervorhebung des bisher in Ökobilanzen systematisch vernachlässigten Ressourcenverbrauchs in der Wirkungsbilanz.

3.4 Die Zielperspektive einer Nachhaltigen Metallwirtschaft

Die zuletzt diskutierte technischen Qualität der Metallstoffströme und der Umgang mit den Stoffen und Energien in der Technosphäre selbst ist in ihnen zwar noch nicht enthalten, ansonsten spiegeln aber die ‚Managementregeln für eine ‚Nachhaltige Stoffwirtschaft‘ die Perspektivwechsel zwischen Out-put und Input-Orientierung recht gut wider. Diese Managementregeln wurden von der Enquete-Kommission ‚Schutz des Menschen und der Umwelt‘ des 12. und 13. Deutschen Bundestags mit Rückgriff auf Vorarbeiten Herman Dalys und des World Business Council for Sustainable Development formuliert³⁴.

Managementregeln einer nachhaltigen Stoffwirtschaft

1. Die Abbaurate erneuerbarer Ressourcen soll deren Regenerationsrate nicht überschreiten. Dies entspricht der Forderung nach Aufrechterhaltung der ökologischen Leistungsfähigkeit, d. h. (mindestens) nach Erhaltung des von den Funktionen her definierten ökologischen Realkapitals.
2. Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht-erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.
3. Stoffeinträge in die Umwelt sollen sich an der Belastbarkeit der Umweltmedien orientieren, wobei alle Funktionen zu berücksichtigen sind, nicht zuletzt auch die ‚stille‘ und empfindlichere Regelungsfunktion.
4. Das Zeitmaß anthropogener Einträge bzw. Eingriffe in die Umwelt muss im ausgewogenen Verhältnis zum Zeitmaß der für das Reaktionsvermögen der Umwelt relevanten natürlichen Prozesse stehen.
5. Gefahren und unvertretbare Risiken für die menschliche Gesundheit durch anthropogene Einwirkungen sind zu vermeiden.

Neben der Verpflichtung zum Übergang auf regenerative Ressourcen - wo immer dies möglich ist - und zur Nutzung dieser regenerativen Ressourcen unterhalb ihrer natürlichen Regenerationsrate wird hier also im Hinblick auf nichtregenerative Ressourcen einerseits auf Substitution und andererseits auf eine zeitliche ‚Streckung‘ der Ausbeutungsrate gesetzt. Es geht um eine Erhöhung der Ressourcenproduktivität, also eine Verbesserung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses beim Einsatz der (Metall)Ressourcen. All dies soll mit größtmöglicher Behutsamkeit bei Eingriffen in (Groß)Ökosysteme verbunden sein – unter Berücksichtigung von deren Tragekapazitäten - und verbunden mit möglichst geringen technischen, toxikologischen und ökotoxikologischen Risiken.

³⁴ Vgl. Daly 1990 und 1991, Enquete-Kommission 1998, S. 46

Da nach derzeitigem Wissen davon auszugehen ist, dass nur für vergleichsweise wenige der heutigen und zukünftigen Einsatzgebiete von Metallen ein Ersatz auf der Basis nachwachsender Rohstoffe zur Verfügung steht bzw. stehen wird, besteht eine Verpflichtung zur Erarbeitung von ‚Wegen zum nachhaltigen Wirtschaften mit Metallen‘, also für eine ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘.

Damit wird der oben diskutierte dritte Perspektivwechsel hin zum Erhalt der technischen Qualitäten unabdingbar. Die Managementregeln konzentrieren sich noch sehr auf Ressourcen- und Umweltpolitik (Abfälle und Emissionen) also auf die Austauschprozesse (input-output) an den Schnittstellen zwischen Öko- und Technosphäre. Strategien hin zu einer nachhaltigeren Metallwirtschaft werden sich demgegenüber viel stärker auf den Umgang mit den Metallen innerhalb der Technosphäre konzentrieren müssen. Im Vergleich zur Rohstoff- und Ressourcenpolitik bzw. der Abfall- und Emissionspolitik wird deshalb der ‚Produktpolitik‘, der Produktherstellung, der Produktnutzung und dem Recycling ein zentraler Stellenwert zukommen. Es wird darum gehen, bei den technischen Kreisläufen innerhalb der Technosphäre das Qualitätsniveau der Stoffe zu erhalten.

Der Blick auf die Schnittstellen zwischen Öko- und Technosphäre wird trotzdem wichtig bleiben. Während das Wirtschaften auf der Basis regenerierbarer Ressourcen auch mit großen Chancen für eine ‚Öffnung‘ hin zur Ökosphäre verbunden ist, sozusagen als ein über landwirtschaftliche Produktionsprozesse vermitteltes ‚Einklinkens in natürliche Kreisläufe‘, wird eine ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ die Übergänge zwischen Ökosphäre und Technosphäre allerdings eher schließen müssen. Hier wird es darum gehen, die stofflichen Übergänge zu minimieren, und zwar sowohl auf der Input- (Streckung der Ressourcenbasis) und noch viel mehr auf der Output-Seite (Vermeidung von Emissionen und dissipativen Verlusten).

Mit Blick auf ihre stofflichen, energetischen und technischen Grundlagen können somit folgende Anforderungen an eine ‚nachhaltige Metallwirtschaft‘ definiert werden³⁵:

Eine nachhaltige Metallwirtschaft basiert im Wesentlichen auf dem möglichst mengen- und qualitätsverlustfreien Umlauf der Metalle in der Technosphäre. Sie erhält und erhöht nach Möglichkeit die Qualität der in der Technosphäre umlaufenden Metallströme. Sie etabliert getrennte Kreisläufe für die verschiedenen Metalle und Legierungen und minimiert deren Verunreinigung. Ihr primärer Ressourcenbedarf wird durch hochwertiges Recycling sowie weitestgehende Vermeidung dissipativer Verluste über die gesamte Metallkette minimiert. Die Ressourcenproduktivität, also das Verhältnis des Material- und Energieaufwands zum angestrebten Nutzen, wird optimiert durch Konzentration auf den nachhaltigen Umgang mit Metallen in der Technosphäre, insbesondere auf die Produktgestaltung und Produktnutzung.

Eine Nachhaltige Metallwirtschaft überschreitet mit ihren Emissionen in Luft, Wasser und Boden nicht die Tragekapazitäten der regionalen und globalen Ökosysteme. Sie trägt zum Erhalt der Produktivität des Naturkapitals bei, indem sie die Akkumulation von Schwermetallen und anderen persistenten toxischen Stoffen in Böden ebenso vermeidet, wie Eingriffe in besonders sensible Ökosysteme, wie z. B. Regenwälder.

Die Minimierung der metallischen und metallinduzierten Stoffströme im Verhältnis zum gesellschaftlichen Nutzen sowohl mit Blick auf langfristige Ressourcenverfügbarkeit, als auch die Tragekapazitäten der Senken würde eine ‚drastische Senkung‘ der derzeitigen Flüsse zwischen der Öko- und der Technosphäre bedeuten. Sie steht in klarem Gegensatz zum eher im Trend liegenden weiteren Anstieg. Die damit geforderte ‚Trendumkehr‘ ist nicht nur nötig, sie scheint im Prinzip auch möglich zu sein, und zwar ohne extreme soziale und ökonomische Einbußen. Der Fokus liegt ja auf den ‚grenzüberschreitenden Umsätzen‘. Eine Senkung der Flüsse zwischen Techno- und Ökosphäre wäre damit selbst mit einer weiter wachsenden Wirtschaft vereinbar, also auch ohne die durchaus mögliche Entkopplung des Wirtschaftswachstums von den Stoff- und Energieströmen innerhalb der Technosphäre. Selbst in Phasen, in denen die Flüsse innerhalb der Technosphäre noch gleich bleiben oder

³⁵ Dies ist damit zugleich ein Versuch, das Leitbild (den Begriff) einer ‚Nachhaltigen Metallwirtschaft‘ zumindest ansatzweise zu definieren.

gekoppelt an das Wirtschaftswachstum weiter ansteigen, können und sollten die ‚grenzüberschreitenden‘ Flüsse zwischen Techno- und Ökosphäre abnehmen.

Mit der Forderung nach einer Minimierung der Austauschprozesse einer Nachhaltigen Metallwirtschaft mit der Ökosphäre stellt sich aber sofort auch die Frage nach dem Zielkorridor. Welche Größenordnung der metallischen und metallbegleitenden Input-Ströme wäre nachhaltig? Wie lange sollen welche Ressourcenqualitäten reichen? Welche Größenordnung von metallischen bzw. metallbegleitenden Output-Strömen verkraften die globalen und regionalen Senken? Wir kennen die Antwort auf diese Fragen noch nicht³⁶. Wahrscheinlich ist aber aus heutiger Sicht, dass die ‚Korridore‘, innerhalb derer sich eine zukünftige ‚Nachhaltige Entwicklung‘ bewegen kann, auf der Input-Seite erheblich größer bzw. breiter sind als auf der Output-Seite. Weniger das Vorhandensein von Metallen in der Erdkruste, sondern eher die Bedingungen und Folgen der Metallgewinnung und –erzeugung auf der Outputseite dürften sich als die entscheidenden limitierenden Faktoren herauskristallisieren.

4 Nachhaltigkeitsstrategien

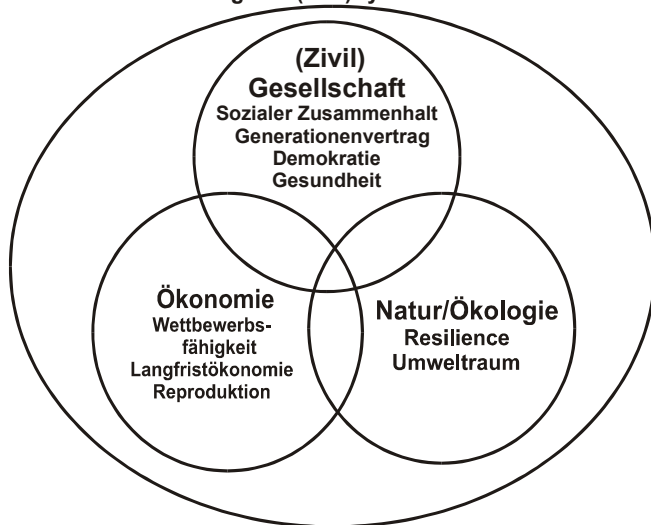
Die langfristig weit reichendsten Nachhaltigkeitsprobleme der Metallwirtschaft beziehen sich auf die Sicherung ihrer Inputs (primäre und sekundäre Ressourcen) sowie auf die Tragekapazitäten der Natur für ihre Emissionen und Abfälle als Teil ihres Outputs (Treibhauseffekt). Die aktuell dringendsten Nachhaltigkeitsprobleme beziehen sich eher auf soziale, ökonomische und ökologische Probleme mittlerer Reichweite, auf aktuelle gesundheitliche und soziale Probleme, auf Gerechtigkeit zwischen derzeit lebenden Generationen (hier und insbesondere mit Blick auf das Nord-Süd-Gefälle) sowie auf lokale bzw. regionale Eingriffe in Ökosysteme durch den Tagebau.

In den beiden Strategietypen Steuerungs- und Prozessstrategie spiegeln sich sowohl verschiedene Systemmodelle als auch verschiedene Verständnisse des Nachhaltigkeitsziels wider. In der am defensiven Nachhaltigkeitsverständnis ausgerichteten, am Erhalt von Mindestbedingungen orientierten **Steuerungsstrategie** wird stark auf Fragen der Tragekapazitäten fokussiert. Es geht um den ‚Erhalt von Optionen‘, es geht um einen Weg in die Zukunft, auf dem zumindest größere Systemzusammenbrüche vermieden werden (vgl. Abbildung 3). In der Steuerungsstrategie geht es also um Mindestvoraussetzungen, um das Notwendige. Gefährdungen durch das Erreichen bzw. Überschreiten der Grenzen von Tragekapazitäten sind aber – wie wir das vom Treibhauseffekt her kennen – meist nicht unmittelbar wahrnehmbar. Die Entwicklungen sind eher schleichend, mit Wirkungen, die erst für die Zukunft erwartet werden, die aber, wenn sie erst einmal eingetreten sind, sich in der Regel nicht mehr umkehren lassen. In der Steuerungsstrategie spielen deshalb wissenschaftliche Erkenntnisse sowohl für die Problemwahrnehmung als auch für die Problemlösung eine besonders wichtige Rolle.

³⁶ Angesichts des Aufwandes, der bisher schon getrieben werden muss(te), um für die Kohlenstoffflüsse in der Atmosphäre zu einigermaßen vertretbaren Aussagen zu kommen, ist klar, dass hierfür mehr nötig ist, als einige eher ‚explorierende‘ Forschungsprojekte. Die Fragen nach dem Korridor für eine Nachhaltige Metallwirtschaft sind gestellt. Sie sind bearbeitbar und, wie am Beispiel der Kohlenstoffkreisläufe demonstriert wird, im Prinzip bis zu einem gewissen Punkt auch ‚beantwortbar‘.

Nachhaltigkeit

Entwicklungen innerhalb der Tragekapazitäten
Vermeidung von (Sub)Systemcrashes



AvG 5/01

Abbildung 3_ Tragekapazitäten nach der Steuerungsstrategie (Gleich 2002:14)

Im Rahmen der Steuerungsstrategie zur Operationalisierung des Nachhaltigkeitsziels wird also defensiv auf das fokussiert, was zum Überleben, bzw. zum Erhalt der Entfaltungs- und Selbststeuerungskapazitäten der sozialen, ökonomischen und ökologischen Großsysteme, notwendig ist. Für ökologische Großsysteme ist beispielsweise relativ unumstritten, dass ihre Stabilität gefährdet ist, wenn der anthropogene Treibhauseffekt die Stabilität des Klimas gefährdet und damit auch die Stabilität der von ihnen wiederum abhängigen sozialen und ökonomischen Systeme. Für das geoökologische Subsystem "Klima" lässt sich – wie erwähnt - auf der Basis von Modellrechnungen inzwischen einigermaßen abschätzen, wie viel treibhausrelevante Gase durch die Menschen in den kommenden hundert Jahren anthropogen (d. h. im wesentlichen aus fossilen Quellen) emittiert werden können, wenn dramatische Entwicklungen in den diversen Subsystemen vermieden werden sollen. In einem gesellschaftlichen Aushandlungsprozess, der durch derartige naturwissenschaftliche Erkenntnisse gespeist und fundiert wird, können dann Grenzen und Reduktionsziele festgelegt werden, die nicht überschritten bzw. unterschritten werden dürfen, wenn ein „Systemcrash“ bzw. dramatische Systemdynamiken vermieden werden sollen.

Nicht nur für ökologische Systeme lassen sich Tragekapazitäten bestimmen. Grenzen der Belastbarkeit existieren in ähnlicher Form auch bei sozialen und ökonomischen Systemen. Als kritische Variablen und damit Kriterien für Tragekapazitäten, kann die Tragfähigkeit sozialer Netze, bzw. Sicherungssysteme, genannt werden, der soziale Zusammenhalt in einer Gesellschaft, der womöglich an bestimmte Bedingungen geknüpft ist, wie z. B. die Kraft und Reichweite gesellschaftlicher Solidarität, sowie die ökonomische Krisenfestigkeit einer Volkswirtschaft oder die Robustheit der demokratischen Verfasstheit von politischen Einheiten. Im ökonomischen Bereich spielt sicher auch die Fähigkeit ökonomischer Systeme eine zentrale Rolle, ihre eigenen natürlichen und gesellschaftlich-kulturellen Voraussetzungen zu reproduzieren. Hier geht es also insbesondere um die Reproduktion des so genannten ‚Humankapitals‘, um die Sicherung der familiären Reproduktion sowie um Bildung und Qualifikation. In all diesen Bereichen müssen für eine ‚nachhaltige Entwicklung‘ Mindestbedingungen erfüllt sein. Allerdings gibt es bisher nur wenige Bereiche, in denen sich solche Tragekapazitäten formalisieren und quantifizieren lassen³⁷.

³⁷ Was die sozio-ökonomischen Systeme keineswegs grundsätzlich von den ökologischen Systemen unterscheidet. Auch bei ökologischen Systemen sind die Möglichkeiten der Bestimmung von ‚critical loads‘ oder ‚carrying capacities‘ auf zwei bis drei Beispielbereiche beschränkt, auf den Eintrag versauernder Substanzen sowie den Eintrag eutrophierender Substanzen in Ökosysteme.

Im Rahmen der Steuerungsstrategie kommt der Wissenschaft eine vergleichsweise wichtige Rolle zu hinsichtlich der Beobachtung schleichender Entwicklungen und der Erforschung von Mindestbedingungen und Tragekapazitäten. Ein zweiter Hauptakteur der Steuerungsstrategie ist - infolge seiner Selbstverpflichtung ‚Schaden von seinen Bürgern abzuwehren‘ - der Staat bzw. sind staatliche und internationale Institutionen. In der Klimaproblematik haben bekanntlich die Vereinten Nationen mit der Klimarahmenkonvention die Initiative ergriffen, inzwischen flankiert und ergänzt durch nationale Strategien und durch Selbstverpflichtungen wirtschaftlicher Akteure.

Die Steuerungsstrategie hat allerdings auch mit spezifischen Problemen zu kämpfen. Die Hauptprobleme liegen in den begrenzten Steuerungsmöglichkeiten von komplexen Systemen und in der Begrenztheit des Wissens über Tragekapazitäten. Mit Blick auf dieses Nicht-Wissen ist einerseits das ‚Noch-Nicht-Wissen‘ zu unterscheiden und andererseits die ‚Nicht-Wißbarkeit‘. Das ‚Noch-Nicht-Wissen‘ kann durch Forschung in Zukunft noch in Wissen umgewandelt werden. Es gibt jedoch auch Bereiche, die prinzipiell nicht ‚wissbar‘ sind, wie eben z.B. die präzise und weit reichende Prognostizierbarkeit des Verhaltens komplexer dynamischer Systeme. Bezogen auf die Ziele einer ‚Nachhaltigen Metallwirtschaft‘ liegen die Lücken des ‚Noch-Nicht-Wissens‘ insbesondere bei der langfristigen Verfügbarkeit von Ressourcen auf der Inputseite (in diesem Fall v. a. Energie und metallische Rohstoffe, aber auch Luftsauerstoff und Wasser) sowie (mit Übergang zur Nicht-Wissbarkeit) bei den globalen und regionalen Tragekapazitäten für Emissionen und Abfälle der Metallkette auf der Outputseite. Die Situation im Rahmen der Steuerungsstrategie hat geradezu eine gewisse Tragik. Sie ist einerseits auf wissenschaftliche Erkenntnisse angewiesen, und hat dort, wo ihr dies gelingt, den Vorteil einer wissenschaftsbasierten politischen Strategie. Auf der anderen Seite stößt sie gerade mit ihren interessantesten Fragestellungen, nämlich denjenigen nach den Tragekapazitäten verschiedener komplexer (Sub)Systeme, sehr schnell an die Grenzen der Wissbarkeit. Systemmodelle und - als wichtige Elemente derselben im Rahmen von Strategien in Richtung auf eine nachhaltige Metallwirtschaft - insbesondere Energie- und Stoffstrombilanzen sowie Energie- und Stoffstrommodelle auf den verschiedenen räumlichen Ebenen (betrieblich, regional, national und global) können immerhin zum Verständnis grundlegender Zusammenhänge wichtige Beiträge liefern.

Aufgrund des oft schleichenden, nicht unmittelbar wahrnehmbaren Charakters der Probleme, auf die sich die Steuerungsstrategie konzentriert und aufgrund ihres eher instrumentellen ja geradezu technokratischen Zugangs hat dieser Strategietyp zum dritten aber auch große Probleme mit der ‚Motivation‘ und Mobilisierung seiner Akteure, sowohl seiner Hauptakteure Wissenschaft und Staat und erst Recht weiterer wirtschaftlicher oder zivilgesellschaftlicher Akteure. Wissenschaft und staatliche Akteure (bzw. Akteure der Staatengemeinschaft) haben alleine gar nicht die Möglichkeiten zur Durchsetzung weitreichender (Vorsorge)Maßnahmen. Dies ist ein wesentlicher Grund dafür, dass die Steuerungsstrategie zur Lösung der meisten Nachhaltigkeitsdefizite alleine nicht ausreicht, und dass sie mit Elementen der Prozessstrategie kombiniert werden muss.

Im Kontrast zur auf das Notwendige, auf Mindestvoraussetzungen und den Erhalt von Handlungsoptionen orientierten defensiven Steuerungsstrategie kann die **Prozessstrategie** als ‚offensiv‘ bezeichnet werden. In ihr geht es eher um das Wünschbare, um das ‚Gute Leben‘. Integriert in das Nachhaltigkeitsziel sind bei diesem Strategietyp all diejenigen Ziele, die die Menschen schon seit langem ‚bewegen‘: Sicherheit, materieller Wohlstand, physisches und psychisches Wohlbefinden, kulturelle Entfaltungsmöglichkeiten, Gerechtigkeit und Freiheit nicht nur mit Blick auf zukünftige, sondern gerade auch auf die derzeit lebenden Generationen. Anstatt sich (vorrangig) an Tragekapazitäten zu orientieren, die für das *Überleben* unabdingbar sind, werden wünschbare Utopien formuliert, die das „Gute Leben“ ausmachen. Das Nachhaltigkeitsziel soll motivierende Kraft erhalten, dazu muss es mit Leben gefüllt, sozusagen ‚ausgemalt‘ werden. Nur mit der mobilisierenden Kraft von ‚konkreten Utopien‘ kann der Nachhaltigkeitsdiskurs die immer noch dominierende

Hinzu kommt als dritter, wie schon angesprochen, inzwischen auch der Klimabereich bezüglich des Eintrags treibhausrelevanter Gase in die Atmosphäre.

Beschränkung auf wenige Spezialisten (z. B. Wissenschaftler wie Klimatologen, politische und ökonomische Akteure) durchbrechen. Wie soll in fünfzig Jahren ein ‚nachhaltiges Leben‘ in Deutschland oder in Hamburg aussehen? Oder bereichsspezifischer, wie stellen wir uns ein nachhaltiges Bauen und Wohnen vor, wie eine nachhaltige Mobilität oder eine nachhaltige Metallwirtschaft ?

Die Akteure der Prozessstrategie sind breit gestreut, reichen weit über die ‚Spezialisten‘ hinaus, die in der Steuerungsstrategie dominieren. Ein ganz wesentlicher Teil dieser Strategie ist der öffentliche Diskurs, der Aushandlungsprozess an den sprichwörtlichen „runden Tischen“. Auch die gezielte Netzwerk- und Kooperationsbildung, die Etablierung von Institutionen übergreifenden Kommunikations-, Aushandlungs-, Konsensfindungs- und Wissenstransferprozessen sind mögliche Bausteine dieses Vorgehens. Die Akteure der Prozessstrategie entstammen in viel stärkerem Maße der Zivilgesellschaft, also den Verbänden und Initiativen der ‚Bürgergesellschaft‘. An den ‚Runden Tischen‘, an denen immer wieder neu die gemeinsam anzustrebenden Ziele und die nächsten gemeinsamen Schritte ausgehandelt werden, sitzen neben Vertretern staatlicher Institutionen, der Wissenschaft und der Wirtschaft insbesondere auch engagierte Bürger sowie VertreterInnen von Gewerkschaften, Umweltverbänden, Dritte-Welt-Gruppen, Bürgerrechtsgruppen und Verbraucherorganisationen. Auch im Rahmen des Projekts ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘, das ja von Anfang an stärker auf Kooperationen mit wirtschaftlichen Akteuren, mit den Unternehmen der Region, ausgerichtet war, spielten diese zivilgesellschaftlichen Akteure eine wichtige Rolle, allerdings weniger in den einzelnen betrieblichen bzw. zwischenbetrieblichen Umsetzungsprojekten, sondern in den beiden Diskursplattformen, die vom Projekt mit geschaffen werden konnten, in der Ringvorlesung ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ und im ‚Forum nachhaltiges Wirtschaften Hamburg, das aus dem Projektbeirat hervorging und bei der Hamburger Handelskammer angesiedelt wurde.

4.1 Möglichkeiten und Grenzen des Stoffstrommanagements

In einem weiteren Schritt soll nun – vor dem Hintergrund der eingeführten Differenzierungen – auf diejenigen Elemente von Nachhaltigkeitsstrategien näher eingegangen werden, die sich explizit mit Stoffen und Stoffströmen beschäftigen. Es sind dies der Ansatz des Stoffstrommanagements³⁸ sowie - sozusagen unterhalb dieses Rahmenkonzepts - die eher quantitativ Effizienzstrategie und die eher qualitativen Ansätze zu einer Konsistenzstrategie bzw. einer ‚Industrial Ecology‘.

Das Projekt ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ war, wie man am ursprünglich gewählten Titel ‚Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg‘ erkennen kann, ursprünglich recht eng am Ansatz des Stoffstrommanagements im Rahmen einer Effizienzstrategie konzipiert worden. Je mehr wir uns nun mit diesen Strategien beschäftigen, in denen der Umgang mit Stoffen und Stoffströmen im Zentrum der Aufmerksamkeit steht, umso deutlicher wird auch eine damit verbundene Einengung der bearbeiteten Nachhaltigkeitsaspekte. Die ökologische Betrachtung rückt ins Zentrum, darüber hinaus spielen die ökonomischen Aspekte von Stoffströmen noch eine große Rolle und auch die gesundheitlichen. Damit sind zwar noch alle drei Nachhaltigkeitsdimensionen integriert, aber doch mit deutlichem Schwerpunkt auf der ökologischen Dimension und entsprechenden Lücken in der ökonomischen und insbesondere auch der sozialen Dimension.

³⁸ Vgl. zu wichtigen Stationen der Debatte über das Stoffstrommanagement im deutschsprachigen Raum: Claus, de Man, Völkle, Wiedemann 1994; Enquete-Kommission 1994, 1998; Friege, Engelhardt, Henseling 1998; Sterr 1999. Insbesondere die Berichte der Enquete-Kommissionen 1994 und 1998 haben das Konzept weit über den wissenschaftlichen Diskurs hinaus bekannt gemacht. Im englischsprachigen Raum wird die Debatte unter Begriffen wie ‚supply-chain-management‘ bzw. spezifischer ‚substance-chain-management‘ geführt vgl. <http://www.uni-oldenburg.de/produktion/sonstiges/subchain/> 2004.

4.1.1 Zwei praktische Beispiele

Die Ansatzpunkte, Möglichkeiten und Grenzen von Stoffstrommanagementprojekten in Kooperation mit Unternehmen sollen zunächst an zwei Projektbeispielen skizziert werden. Anschließend wird das Konzept des Stoffstrommanagements in den bisher aufgespannten theoretischen Rahmen eingeordnet und es werden mögliche Weiterentwicklungen diskutiert.

4.1.1.1 Hochwertige Schleifschlammverwertung

Aufgrund ihrer ungünstigen Geometrie und des vergleichsweise hohen Schadstoffanteils können diese Eisenmetall-Fractionen bislang meist nicht sinnvoll wieder in den Sekundärstahlkreislauf eingespeist werden, so dass hier relevante „Verluste“ auftreten. Die mit Kühlschmierstoffen behafteten Metallspäne/-schlämme müssen zuerst entölt, dann gepresst und gesintert werden, damit sie derart konditioniert für den direkten Wiedereinsatz im Schmelzbad von Elektrostahlwerken geeignet sind. Interessanterweise existierte im regionalen Kontext bereits eine entsprechende Pilotanlage zur Sinterung von Schleifschlämmen, gefördert durch das Umweltministerium von Schleswig-Holstein. Der Anlagenbetreiber hatte ein hohes Interesse daran, die „Nachhaltigkeits-Vorteile“ seines Prozesses gerade im lokalen Zusammenhang mit den potentiellen Abnehmern des gesinterten Materials aktiver kommunizieren zu können. Die vom Projekt angebotene Bilanzierung und Modellierung der Verwertungseffekte wurde als sehr guter Weg angesehen, auf der Plattform der projektbegleitenden regionalen Nachhaltigkeitsdebatte in der Metallwirtschaft, die Effekte einer Kreislaufschließung für den Bereich der Schleifschlämme plastisch zu verdeutlichen. Bedauerlicherweise musste der Anlagenbetreiber dann aber aufgrund einer ökonomisch unglücklichen Vorhistorie Konkurs anmelden. Problemverschärfend hinterließ er auf seinem Werksgelände beträchtliche Mengen der noch unbehandelten Schleifschlämme. Dabei handelte es sich um sehr problematische „Altlasten“, die beim Elbehochwasser 2002 aufgrund ihrer Uferlage auch in überregionalen Pressemitteilungen für Negativschlagzeilen sorgten.

4.1.1.2 Minimalmengenschmierung

Auch das Teilprojekt zur Kühlschmierstoffproblematik war ganz wesentlich durch Entsorgungsprobleme bestimmt, wobei auch hier (ähnlich wie bei den Schleifschlämmen) der Druck der ökologischen Probleme einer ehemals nicht sachgerechten Entsorgung mittlerweile durch Internalisierung bisher externer Kosten als ökonomischer Druck steigender Handhabungs- und Entsorgungskosten erscheint (zusätzlich Kosten für Speziallager, Pflege der Emulsion, Reinigung der Werkstücke und Maschinen usw.). Außerdem spielt hier auch noch der Arbeitsschutz eine wichtige Rolle. Alle drei Nachhaltigkeitsdimensionen sind in diesem Teilprojekt massiv angesprochen. Die Lösung der angedeuteten Nachhaltigkeitsdefizite wurde deshalb auch in diesem Teilprojekt nicht in einer noch besseren Entsorgung gesucht, sondern in der Substitution, also eher in der Problemreduktion bzw. Problemvermeidung. Bei der Minimalmengenschmierung wird fast völlig auf den Einsatz von Kühlschmierstoffen verzichtet. Nur eine verschwindend kleine Menge Schmierstoff wird direkt am Schnitt eingebracht und verdampft dort während des Prozesses. Das bedeutet hinsichtlich der Funktion von KSS, dass die Aspekte Kühlung und Abtransport der Späne auf andere Weise realisiert werden müssen.

Bei der Einführung der so genannten Minimalmengen-Schmierung in der spanenden Metallbearbeitung handelt es sich somit einerseits um eine Effizienzsteigerung (und das bezogen auf den problematischen Kühlschmierstoffeinsatz sogar um den Faktor 1000), auf der anderen Seite handelt es sich aber für die beteiligten Betriebe um eine echte technologische und auch sehr weit reichende organisatorische und technische Innovation, auch wenn die Einführung der Minimalmengenschmierung aus nationaler Sicht eher als Diffusion einer bereits bestehenden Technik bzw. Vorgehensweise beschrieben werden kann.³⁹ Eine wesentliche Voraussetzung für den praktischen Erfolg dieses Teilprojekts unter

³⁹ Als auch im breiteren Rahmen innovative neue Anforderung kann allerdings der im Projekt

den Rahmenbedingungen produzierender KMU waren in diesem Fall schon bestehende langjährige Kooperationsbeziehungen zwischen dem Institut für Fertigungstechnik an der Fachhochschule Hamburg einerseits sowie einer Reihe regional ansässiger mittelständischer Metallverarbeiter und dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VMA) andererseits. An diese bestehenden Technologie-Netzwerke konnten die Aktivitäten im Projektrahmen sehr gut andocken. Auf der Basis erfolgreicher Kooperationserfahrungen der Vergangenheit und begleitet von einer Vielzahl persönlicher Kontakte wagten die Pionierbetriebe dann auch die Umstellung produktionsrelevanter (Engpass-)Aggregate. Inzwischen sind schon mehrere Bearbeitungszentren ‚trocken gelegt‘.

4.2 Effizienzstrategie und Stoffstrommanagement

So wie die vorgestellten Beispiele setzen die meisten bisherigen Projekte des Stoffstrommanagements setzen entweder an den Abfallströmen an, oder sie zielen auf eine Verbesserung der Ressourceneffizienz innerbetrieblicher Prozesse. Doch auch weit darüber hinausreichende Konzepte einer Verbesserung der Ressourceneffizienz entlang der gesamten Produktlinie sind denkbar.

Die Öko-Effizienzstrategie kann verstanden werden als ein Ansatz, der auf verschiedene Restriktionen der Umweltpolitik der 70er und 80er Jahre reagierte und zu überwinden versuchte. Ein wichtiger Ausgangspunkt der ursprünglichen Konzeptionen eines Stoffstrommanagements war ohne Zweifel die Abfallproblematik (vgl. Spangenberg; Verheyen 1996, Strebel 1998). Mittlerweile geht es längst nicht mehr nur um den Umgang mit Abfällen oder um Abfallvermeidung (dann schon mit Blick auf die ganze Wertschöpfungskette), sondern um eine Wertschöpfungsketten übergreifende Optimierung von Stoffströmen. Hierfür hat ohne Zweifel der parallel sich durchsetzende Ansatz der Ökobilanz mit seiner Betrachtung des Produktlebenszyklus ‚von der Wiege bis zur Bahre‘ Pate gestanden. Ein zweiter wichtiger Punkt war die Überwindung einer Umweltmedien bezogenen Betrachtung. Um bloße Problemverschiebungen zwischen den Umweltmedien Luft, Wasser und Boden zu vermeiden, war es wichtig, eine solche medienübergreifende Betrachtung zu wählen. Insofern sind die Effizienzstrategie und das Stoffstrommanagement auch als Elemente des Übergangs von der End-of-Pipe-Politik zum Prozess- und produktintegrierten Umweltschutz zu verstehen. Und schließlich hat für die Karriere des Konzepts eines Stoffstrommanagements auch der Übergang von der qualitativen, auf (öko)-toxikologische Wirkungen einzelner Stoffe zentrierten Betrachtung zur quantitativen Betrachtung großer Stoffströme eine wesentliche Rolle gespielt. Letzteres war einerseits eine Reaktion auf die Restriktionen und immensen ungelösten Erkenntnisprobleme einer auf der Kenntnis (öko)toxikologischer Wirkung aufbauenden Chemikalien bzw. Stoffpolitik und andererseits auf die Erfahrung, dass auch vergleichsweise (öko)toxikologisch harmlose Stoffe, wie Stickstoff, Phosphor oder CO₂, aber auch Wasserverbrauch und Erdaushub zu großen ökologischen Problemen führen könne, wenn sie als große Ströme auftreten⁴⁰.

In der ‚Rationalisierung‘, im Aufspüren von Effizienzpotentialen und in der Optimierung existierender Prozesse und Produkte liegen die größten Potentiale und Erfolge der Effizienzstrategie und des Stoffstrommanagements. Beide Ansätze können einzelbetrieblich eingesetzt werden, aber erst in der überbetrieblichen, Wertschöpfungsketten übergreifenden bzw. produktlebenszyklusorientierten Betrachtung können sie ihre nachhaltigkeitsorientierten Potentiale wirklich ausschöpfen⁴¹.

erfolgreich realisierte Anspruch gewertet werden, entsprechende Lösungen auch für problematische Legierungen (in diesem Fall hochveredelte Stähle) und besonders problematische Geometrien zu erarbeiten.

⁴⁰ Vgl. Schmidt-Bleek 1993 a und b, 1994

⁴¹ Bekannt geworden sind verschiedene Zielprojektionen, um welchen Faktor die Ressourcenproduktivität gesteigert werden kann, ohne dass wirtschaftliche Einbußen zu befürchten sind (Faktor 4, vgl. von Weizsäcker; Lovins 1995) bzw. um welchen Faktor die

Wesentliches Ziel der Effizienzstrategie auf dem Weg zum Nachhaltigen Wirtschaften ist die Steigerung der Ressourceneffizienz bzw. Ressourcenproduktivität. Dabei geht es darum, mit weniger Input an Stoffen und Energie gleich viel oder sogar mehr Produkte oder Dienstleistungen bereit zu stellen. Derartige Effizienzsteigerungen sind im wirtschaftlichen Alltag eine weit verbreitete Praxis, da durch sie unmittelbar auch Kosten eingespart werden können (Rationalisierung). Die Effizienzstrategie zur Operationalisierung des Nachhaltigen Wirtschaftens beruht auf der These, dass im alltäglichen Wirtschaften immer auch ungenutzte Effizienzpotenziale brachliegen bzw. sich eröffnen, die durch vermehrte Anstrengungen in diesem Bereich genutzt werden können. Aufgedeckt werden diese Potenziale nicht zuletzt durch die gezielte sowohl inner- als auch überbetriebliche Analyse von Stoff- und Energieströmen und auch durch eine veränderte (Fluss)Kostenrechnung⁴². Schon die einfache analytische Verknüpfung der eingekauften Inputströme mit den gegen Gebühren zu entsorgenden Abfallströmen kann vorher nie gesehen Kosteneinsparpotentiale deutlich machen⁴³. Weitere interessante Potentiale liegen z. B. in den Lager- und Handhabungskosten. Im Rahmen der Effizienzstrategie eröffnen sich klassische win-win Perspektiven, bei deren Realisierung zugleich die Umwelt geschont und Kosteneinsparungen erzielt werden können (Huber 2001: 309).

Die Effizienzstrategie entspricht einem wichtigen Element der Alltagslogik von Unternehmen, der Rationalisierung. Insofern lassen sich ihre Projekte vergleichsweise problemlos in die betriebliche Praxis integrieren, da:

- die Verfahren der ‚Rationalisierung‘ im betrieblichen Wirtschaften bekannt und etabliert sind,
- die Veränderungen sich in der Regel auf einzelne Prozesse beziehen und damit technisch gut handhabbar sind,
- sie oft in der Verantwortung von nur einer Abteilung, bzw. einer überschaubaren Anzahl von Personen liegen und damit organisatorisch gut umsetzbar sind,
- sie angepasst an die Investitionszyklen der Prozesstechnik erschlossen werden können und dadurch (wenn überhaupt) nur zu „Mehrkosten“ einer ohnehin anstehenden Investition führen (Wirtschaftlichkeit),
- sie als inkrementelle Innovationen in ihrem Effekt leicht zu prognostizieren (geringes Risiko) und gut zu steuern sind (Erfolgskontrolle) und
- sie sich oft kurzfristig realisieren lassen.

Die ersten kritischen Reaktionen gegenüber dem Stoffstrommanagement hatten sich noch eher an seinen technokratischen Konnotationen festgemacht. Stoffstrommanagement, das klang zunächst wie ‚Planwirtschaft‘. Diese anfängliche Kritik mag unberechtigt gewesen sein, trotzdem schwingt im Konzept des Stoffstrommanagements immer auch ein Anspruch mit, demzufolge mit Hilfe dieses ‚Instruments‘ der Rationalität im Bereich der Stoffströme endlich zum Durchbruch verholfen werden soll. Dem Vorwurf eines planwirtschaftlichen Ansatzes und der Überschätzung von Steuerungsmöglichkeiten im realen Wirtschaften sollte schon mit der von der Enquete-Kommission gewählten ‚Definition‘ gezielt begegnet werden, in der

Ressourcenproduktivität in den Industrienationen gesteigert werden muss, wenn Nachhaltigkeit erreicht werden soll (Faktor 10, vgl. Schmidt-Bleek 1998). Auch das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) sieht in der Ressourceninanspruchnahme ein Schlüsselproblem: „Eine Reduzierung des Ressourcenverbrauchs in den Industrienationen um das 10-fache ist ein notwendiges langfristiges Ziel, wenn angemessene Ressourcen für die Bedürfnisse der Entwicklungsländer bereit gestellt werden sollen“ vgl. UNEP 1999

⁴²Umweltkostenrechnung, Materialflusskostenrechnung

⁴³Die inner- und zwischenbetrieblichen Stoffströme waren (und sind noch) in den meisten Fällen überhaupt nicht bekannt. Zwei weitere Faktoren tragen allerdings zunehmend dazu bei, dass diese ‚black box‘ aufgeheilt wird. Es ist dies zum einen die im deutschen Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz enthaltene Vorschrift zur Aufstellung von Abfallwirtschaftsplänen und zum anderen die Erfassung der betrieblichen Stoff- und Energieströme im Rahmen der Vorbereitung auf eine Zertifizierung des betrieblichen Umweltmanagementsystems nach dem europäischen EMAS-Standard, vgl. Schmidt; Schorb 1995.

wesentlich realistischer nur noch von ‚Beeinflussung‘ der Stoffströme die Rede ist: „Unter dem Management von Stoffströmen der beteiligten Akteure wird das zielorientierte, verantwortliche, ganzheitliche und effiziente Beeinflussen von Stoffsystemen verstanden, wobei die Zielvorgaben aus dem ökologischen und dem ökonomischen Bereich kommen, unter Berücksichtigung von sozialen Aspekten. Die Ziele werden auf betrieblicher Ebene, in der Kette der an einem Stoffstrom beteiligten Akteure oder auf der staatlichen Ebene entwickelt“⁴⁴. Eine andere Definition lautet folgendermaßen: „Das Stoffstrommanagement zielt auf die ökologisch und ökonomisch effiziente Beeinflussung von Stoffströmen unter Berücksichtigung sozialer Aspekte. Ausgangspunkt ist eine möglichst umfassende Stoffstromanalyse, die eine medienübergreifende Bewertung ermöglicht. Darauf aufbauend sind Strategien zu entwickeln, um die Ziele zu erreichen. Prinzipiell geht es dabei um die Senkung des Materialdurchsatzes durch die gesamte Wirtschaft und um die Verringerung und den Ersatz ökologisch bedenklicher Stoffe“⁴⁵. Wenn das Stoffstrommanagement Erfolg haben soll, darf es sich schon bei der Stoffstromanalyse nicht allein auf die Analyse von Stoffströmen beschränken, sondern es muss von Anfang an versuchen, auch die Akteursbeziehungen mit abzubilden bzw. zumindest mit zu erfassen und zu verstehen⁴⁶. Auch wenn es immer wieder so aussieht, als sei die Effizienzstrategie der Königsweg zum Nachhaltigen Wirtschaften, so muss doch darauf hingewiesen werden, dass mit ihr auch deutliche Restriktionen verbunden sind.

So lassen sich zwar ohne Zweifel nicht nur innerbetrieblich, sondern insbesondere auch überbetrieblich zahllose - und zum Teil recht erhebliche - ungenutzte Effizienzpotentiale identifizieren. Die entscheidenden Hemmnisse und Restriktionen, das zeigt mittlerweile die Erfahrung, liegen allerdings nicht vor allem darin, dass diese Effizienzpotentiale nicht entdeckt werden. Die grundlegende Restriktion ist eher die (Un)Fähigkeit von Unternehmen, diese Potentiale auch auszuschöpfen. Als letztlich entscheidend für den Erfolg auch der Effizienzstrategie zeigt sich immer wieder die *Innovationsfähigkeit* von Unternehmen bzw. Unternehmensnetzwerken.

Viele Effizienzverbesserungen verlaufen zudem auf etablierten Technikpfaden und beziehen sich auf etablierte industrielle Arrangements (Produkte und Prozesse). Auf diesen Pfaden nimmt allerdings mit steigendem Erfolg der erforderliche Aufwand für weitere Effizienzsteigerungen exponentiell zu, d. h. der erzielbare *Grenznutzen* weiterer Effizienzverbesserungen sinkt rapide. Wirklich weit reichende Verminderungen beim Stoff- und Energieaufwand lassen sich dann nur noch durch Pfadwechsel, also wiederum nur durch weiter reichende Innovationen erzielen. Es zeigt sich zudem auch die Gefahr, dass die erzielbaren Effizienzgewinne durch Wachstumseffekte bzw. den Rebound-Effekt negativ überkompensiert werden. Der *Rebound-* oder auch *Boomerang-Effekt* bezeichnet nachteilige Nebenwirkungen, die die erwünschte Hauptwirkung vermindern oder sogar überwiegen können. Im engen Sinne verstanden handelt es sich dabei um Effekte, die gerade wegen der intendierten Hauptwirkung eintreten. Darüber hinaus bezeichnet der Rebound-Effekt im weiteren Sinne aber auch Effekte, bei denen die gewünschte Wirkung durch andere Entwicklungen kompensiert wird. Ein Beispiel ist die Kompensation von Effizienzverbesserungen durch Mengenwachstum. Durch höhere Effizienz sinkt z. B. zwar der spezifische Treibstoffverbrauch pro Kilometer bei einzelnen Autos, doch wenn mehr Autos die Straßen bevölkern, ggf. eine höhere Kilometerleistung haben und sich womöglich auch noch mit höheren Geschwindigkeiten bewegen, kann sich ein insgesamt höherer Treibstoffverbrauch und damit statt einer Entlastung ein zusätzliche Belastung der Umwelt ergeben (Huber 2001: 312). Diese unerwünschten Nebenwirkungen müssen entsprechend berücksichtigt und die Effizienzstrategie in ihrer Wirksamkeit mit den negativen Trends verglichen werden. Mit Blick auf die Gefahr einer Überbeanspruchung ökologischer Tragekapazitäten sind schließlich nur die absoluten Gesamtemissions-Werte relevant und nicht allein einzelprodukt- oder prozessspezifische Verbesserungen. Trotzdem muss

⁴⁴ Enquetekommission 1994, S. 449

⁴⁵ <http://www.umweltdatenbank.de/lexikon/stoffstrommanagement.htm> 2004.

⁴⁶ Auf diese notwendige Verknüpfung zwischen den naturwissenschaftlich-technischen und den ökonomisch-organisatorischen Strömen bzw. Ketten weist insbesondere Fels hin, vgl. Fels 2002

selbstverständlich betont werden, dass auch derartige spezifische Verbesserungen wichtig und hilfreich sind im Rahmen einer Strategie in Richtung Nachhaltigkeit.

Die Reichweite von Effizienzstrategien hängt zudem von so genannten *Lernkurven*, S- oder Lebenszykluskurven ab, die bei der Entwicklung von vielen verschiedenen ökologischen und sozialen Systemen beobachtet werden können. Wird die Effizienzsteigerung dieser Systeme über die Zeit aufgetragen, entsteht eine S-Kurve. Nach einem grundlegenden Strukturwandel (Basisinnovation oder Eroberung einer neuen ökologischen Nische) sind rasches Wachstum und eine Steigerung der Effizienz von Systemen relativ einfach zu realisieren. Im Laufe der Zeit nehmen diese Steigerungen aber ab, bis sie sich schließlich dem Grenznutzen asymptotisch annähert. Derartige Lernkurven scheinen auf ökologische, soziale aber auch auf technische und wirtschaftliche Entwicklungen übertragbar zu sein (Huber 2000: 114). Unklar ist jedoch, wie festgestellt werden kann, welche Teilsysteme (Technologien, Märkte) sich in welcher Phase des Zyklus befinden. Auch ist die genaue Form und Skala der S-Kurven für verschiedene Systeme durchaus unterschiedlich. Als Fazit kann jedoch eine prinzipielle Begrenzung der *Reichweite* von Effizienzstrategien gezogen werden, solange sie sich auf die Optimierung entlang eines Technologie- oder Produktpfades beschränken. Je näher man dabei dem Grenznutzen kommt, desto schlechter wird das Aufwands-Ertragsverhältnis, der Grenznutzen sinkt. Oder anders ausgedrückt: Dicht am Grenznutzen können nur noch begrenzt und mit exponentiell steigendem Aufwand Effizienzsteigerungen erreicht werden (Huber 2000: 116). Um diese Einschätzung zu fundieren, wäre jedoch mehr Wissen über die Form der einzelnen Lernkurven und insbesondere über den aktuellen Abstand von Systemen zum Grenznutzen notwendig. Letzteres wäre beispielsweise durch die Kenntnis maximaler Wirkungsgrade bei Stoffumwandlungsprozessen möglich, z. B. in Anlehnung an die Carnot-Linie bei Energiewandlungsprozessen. Derartige Informationen würden die Akteure eher in die Lage versetzen, die noch unausgeschöpften Potentiale ins Verhältnis zu setzen zu dem damit verknüpften Aufwand zu ihrer Realisierung. Dies ist vermutlich nur mit dem schon angesprochenen thermodynamischen Bewertungsansatz möglich, der als ‚Entropiebilanzierung‘ im Projekt entwickelt wurde.

Zusammenfassend hat die Effizienzstrategie also mit folgenden Problemen zu kämpfen:

- Einem tiefer liegenden Angewiesensein auf Innovationsfähigkeit
- Bei Effizienzsteigerungen entlang einer Technologie- oder Produktlinien einem tendenziell strukturkonservativen Ansatz
- Einem immer problematischer werdenden Aufwand-Nutzen-Verhältnis auf diesen Pfaden (abnehmender Grenznutzen)
- Der Fokussierung nur auf Teilbereiche des Systems, wodurch die gesamte Systemoptimierung ggf. außer Betracht bleibt
- Dem Rebound-Effekt, der die positiven Wirkungen aufheben oder überwiegen kann.

4.3 Konsistenzstrategie und Industrial Ecology

Im Rahmen der Effizienzstrategie stehen eher die Quantitäten der Stoffströme im Zentrum der Betrachtung. Die Konsistenzstrategie betrachtet hingegen stärker die Qualitäten der Stoffe und Stoffströme. Als vermittelnd zwischen den beiden Strategien kann ein spezifischer Ansatz des Stoffstrommanagements betrachtet werden, bei dem eine (meist regionale) Vernetzung verschiedener Stoffströme versucht wird, so dass die Abfälle des einen Prozesses als Rohstoffe für nahe liegende andere Prozesse genutzt werden können. Dieser letztgenannte Ansatz wurde unter dem Stichwort ‚industrielle Symbiose‘ bekannt⁴⁷. Noch ein Stück weiter greift die Konsistenzstrategie⁴⁸ mit ihrer Orientierung am Versuch einer Einbettung des anthropogenen Stoffwechsels in den ‚natürlichen‘ - ein Ansatz der in anderen

⁴⁷ Vgl. Christensen 1998, Sterr 1999. Vergleichbares wird auch unter dem Titel ‚zero emission‘ vertreten vgl. Kühr 2000

⁴⁸ Vgl. Huber 1995; Huber 2001; Braungart, McDonough 2003

Zusammenhängen auch als Ökoeffektivität bezeichnet wurde⁴⁹.

Die *Konsistenzstrategie* hat zum Ziel, die Qualität und Quantität des Stoffwechsels zwischen Techno- und Ökosphäre so zu gestalten, dass der gesellschaftliche Stoffwechsel qualitativ und quantitativ mit dem natürlichen Stoffwechsel kompatibel wird. Dies kann einerseits durch eine gezielte und möglichst weit reichende Schließung der Stoffkreisläufe in der Technosphäre (bzw. Abschließung gegenüber der Ökosphäre) geschehen (Recycling, geschlossene Systeme), oder andererseits durch eine bewusste Öffnung hin zum natürlichen Stoffwechsel, z. B. durch den Umstieg auf regenerierbare Energie- und Stoffquellen, hin zu einer ‚solaren‘ Wirtschaft auf der Basis von Sonnenenergie und Biomasse unter Berücksichtigung der entsprechenden ‚nachhaltigen‘ Tragekapazitäten. Die Konsistenzstrategie ist damit auf sehr viel weiter reichende Innovationen angewiesen, als die Effizienzstrategie. Innovationsfähigkeit gehört damit noch viel stärker zu ihren grundlegenden Voraussetzungen, als dies ja auch schon für die Effizienzstrategie der Fall ist. Im Rahmen der Konsistenzstrategie geht es nicht nur um die Verbesserung der Wirkungsgrade vorhandener Technologien und Produktlinien, sondern um einen strukturellen Wandel durch Basisinnovationen bei Technologien, Produkten und Organisationsformen.

Zur den Vorteilen der Konsistenzstrategie zählen somit u. a.:

- Ein hohes Potenzial zur Schonung der Umwelt durch Optimierung des gesamten Systems,
- Eine Orientierung an den Qualitäten und Quantitäten der natürlichen Stoffumsätze,
- Die Orientierung auf die Förderung der Möglichkeiten zur Systemoptimierung (Innovationsfähigkeit) und auf Basisinnovationen, auf deren Grundlage dann neue Lernkurven begonnen werden können.

Zu den Nachteilen der Konsistenzstrategien gehören u. a.:

- Dass Basisinnovationen in ihren Folgen schwer zu prognostizieren sind und daher ein hohes Fehlschlagsrisiko bergen.
- Dass zu ihrer Realisierung in der Regel mehrdimensionale Rahmenbedingungen erfüllt sein müssen, dazu gehören u. a.:
Möglichkeiten zur kreativen abteilungsübergreifenden Zusammenarbeit innerhalb und zwischen Unternehmen
Eine vertrauensvolle Kooperation mit den Unternehmen in der Produktionskette
Ein hoher organisatorischer Aufwand zur Systemumstellung
Das Angewiesensein auf Zeitfenster (windows of opportunity) vor dem Hintergrund unterschiedlicher Investitionszyklen in den verschiedenen Unternehmen.

Die genannten Restriktionen der Konsistenzstrategie sind allerdings nicht typisch für diese spezielle Strategie. Es handelt sich um Restriktionen, mit denen so ziemlich allen Innovationen in der Wirtschaft zu kämpfen haben, egal ob dabei neue Märkte, die Senkung von Kosten oder die Verringerung ökologischer Effekte das Ziel sind.

- Die Konsistenzstrategie besitzt einen spezifischen Stellenwert im Rahmen des aktuellen Umweltinnovationsdiskurses, mit dem sich der ökologische Modernisierungsdiskurs fortsetzt (Huber 2001: 314). Sie steht somit in einer Reihe von ähnlichen Ansätzen, die heute zunehmend unter einem weit gefassten Verständnis von *Industrial Ecology* zusammengefasst werden. Die *Industrial Ecology* orientiert sich bei der Gestaltung industrieller Produktionssysteme am Vorbild von Ökosystemen, wobei der Nutzung regenerierbarer Stoff- und Energiequellen in einer hocheffizienten Kreislaufwirtschaft sowie der raschen Abbaubarkeit (Kompostierbarkeit) der wenigen verbleibenden Reststoffe eine besondere Bedeutung zukommt⁵⁰.

⁴⁹ Vgl. Huber 2000, Clausen, Stahlmann 2000; Braungart; McDonough 2003

⁵⁰ Vgl. zum Ansatz einer *Industrial Ecology* insbesondere die *International Society for Industrial Ecology* www.yale.edu/is4ie mit der Zeitschrift 'Journal of Industrial Ecology'. Auch andere

4.4 Grenzen des regionalen Stoffstrommanagements und der regionalen Verknüpfung von Stoffströmen

Die ‚Regionalisierung von Stoffströmen‘, die Engführung wenn nicht gar Schließung regionaler Stoffkreisläufe wird oft als wichtiges Ziel des Stoffstrommanagements betrachtet. Noch viel stärker gilt dies für das schon angesprochene Leitbild einer ‚industriellen Symbiose‘. Die regionale Vernetzung von Stoff- und Energieströmen im dänischen Kalundborg diente und dient noch heute als viel beachtetes und viel zitiertes Vorbild einer solchen ‚industriellen Symbiose‘⁵¹. Versuche der strategischen Umsetzung dieses Leitbildes haben aber mit noch massiveren Problemen und Restriktionen zu kämpfen als die im Vergleich dazu wesentlich breiter und flexibler angelegte Effizienzstrategie. Regionale industrielle Komplexe werden heutzutage kaum (mehr) ‚am Reißbrett‘ geplant. Sie werden auch immer weniger völlig neu ‚auf der grünen Wiese‘ entstehen. In den meisten Fällen beschränken sich die Möglichkeiten darauf, schon existierende Unternehmen mit ihren jeweiligen Energie- und Stoffströmen untereinander zu verknüpfen⁵². In einem Teilprojekt zum Thema ‚hochwertige Strahlmittelverwertung‘ ist uns eine solche regionale Verknüpfung auch im Rahmen des Projekts ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ ansatzweise gelungen.

4.4.1 Beispiel: Hochwertige Strahlmittelverwertung

Strahlmittelabfälle sind im Vergleich zu Schleifschlämmen zwar von ihrer stofflichen Zusammensetzung her vergleichsweise ‚rein‘. Ihre Problematik liegt in ihrer Struktur. Die Kleinheit und damit verbunden die große Oberfläche der Partikel führt zu einer ‚akuten‘ toxikologischen Problematik im Zusammenhang mit der Lungengängigkeit der enthaltenen Stäube. Die große Oberfläche der Partikel bietet auch Ansatzpunkt für geradezu explosionsartige Oxidationsprozesse. Um Strahlmittelabfälle verwerten zu können, müssen sie somit vorbehandelt, d. h. insbesondere kompaktiert werden, da sie sonst nicht eingeschmolzen werden können. Die in einem Partnerunternehmen anfallenden Strahlmittelabfälle werden mit den entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen verpackt und zur Verwertung ins Ruhrgebiet transportiert. Zunächst wurde im Rahmen dieses Teilprojektes nur untersucht, ob sich nicht – im Sinne der Ziele einer Engführung regionaler Stoffströme - eine geographisch näher liegende Verwertungsmöglichkeit finden ließe. Doch dann entstand in Kooperation mit dem Institut für Werkstoffprüfung und Werkstofftechnik an der Fachhochschule Hamburg die Idee für eine wesentlich höherwertigere Form des Recyclings. Da die Strahlmittel schon als Pulver vorliegen, sollte eine Recyclingform angestrebt werden, bei der nicht nur der Werkstoff, sondern gerade auch seine partikuläre Struktur genutzt werden kann. Es ging also um die Frage, ob das ‚Pulver‘ nicht auch in der ‚Pulvermetallurgie‘ eingesetzt werden kann. Tatsächlich konnte ein Unternehmen in der Region gefunden werden, das Reibbeläge herstellt, und an einem entsprechenden Versuch interessiert war. Die Eignung der Strahlmittelabfälle als Einsatzstoff für die Reibbelägeherstellung konnte in ersten Versuchsreihen erfolgreich praktisch belegt werden. Zwei nicht untypische Faktoren ließen dann allerdings den weiteren Fortgang stocken. Zum einen war beim Reibbelägehersteller, der u. a. auch die Flugzeugindustrie beliefert, ein Qualitätsmanagementsystem nach ISO 9000 etabliert. Es war unklar, inwiefern die Verwendung von ‚Abfällen‘ als Rohstoffe ‚zertifiziert‘ werden kann. Zum anderen wurden Bedenken erhoben im Hinblick auf die durch die regionale Verknüpfung entstehende Abhängigkeiten in der Rohstoffversorgung. Man machte sich dadurch abhängig von der

Ansätze wie ‚Industrial Metabolism‘ vgl. Baccini, Brunner 1991 sowie Ayres, Simonis 1994 sind hier einzuordnen.

⁵¹ Christensen 1998

⁵² Vgl. für entsprechende Versuche und durchaus auch (begrenzte) Erfolge Sterr 1998, 2002; Grossmann et al 1999, 2002 sowie vom Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung ISI das Projekt Cooperation für umweltschonenden Ressourcenaustausch: regionale Unternehmensvernetzung zur Schließung von Energie- und Stoffkreisläufen <http://www.nachhaltig.org/isi/reg05fr.htm>;

‚Abfallerzeugung‘ in einem anderen Unternehmen. Die artikulierten Probleme bezogen sich also sozusagen einerseits auf die Qualität und andererseits auf die ‚Liefersicherheit‘ der Abfälle als ‚Rohstoffe‘. Das Projekt stockte. Die erwartbaren Kostenvorteile (kostenloser Rohstoff) konnten diese Bedenken offenbar nicht aufwiegen.

Insgesamt scheinen die bisher vorliegenden Erfahrungen zu zeigen, dass sich ein solcher auf die regionale Schließung von Stoffkreisläufen zielender Ansatz unnötig selbst einengt. Je kleiner die Region, je enger der Handlungsraum gezogen wird, desto unwahrscheinlicher wird eine sinnvolle Verknüpfung der auftretenden Stoffströme. Vieles spricht dafür, dass derartige Verknüpfungen erst in wesentlich größeren räumlichen Dimensionen nachhaltigen Erfolg versprechen⁵³. Hinzu kommt, dass inzwischen in vielen empirischen Projekten immer deutlicher wird, dass dem Transportaufwand weder ökologisch noch ökonomisch eine derart hohe Bedeutung zukommt, dass allein von ihm her eine starke Regionalisierung von Stoffströmen begründet werden könnte. Und schließlich zeigen die Erfahrungen aus der Chemischen Industrie, die die Verknüpfung ihrer Stoffströme in der so genannten ‚Kuppelproduktion‘ über viele Jahrzehnte hinweg optimiert hat, dass eine derart enge Vernetzung von Stoffströmen auch zum Innovationshemmnis werden kann. Jede kleinste Veränderung in solchen hocheffizient vernetzten Systemen hat schließlich dann weit reichende Auswirkungen im Gesamtsystem⁵⁴.

4.5 Perspektivwechsel bei der Betrachtung von Stoffen und Stoffströmen

Vergleichsweise unabhängig von einer möglicherweise zu eng ausgelegten Option des ‚Lernens von der Natur‘ und einer daraus abgeleiteten zu engen Vorstellung von Stoffkreisläufen ist allerdings der Impuls, der hinsichtlich der Beachtung der qualitativen Aspekte von Stoffströmen von der Konsistenzstrategie ausgeht. Dieser Impuls ist für das Projekt zur ‚Nachhaltigen Metallwirtschaft‘ selbst dort wichtig, wo es nicht vornehmlich darum geht, mit Blick auf Metallstoffströme und ihre Begleit- und Nebenstoffströmen nach umweltverträglicheren (konsistenteren) Stoffen und Prozessen zu suchen. Dies lag nicht im Fokus des Projekts. Und mit der Ausnahme einiger Hilfsstoffe in den Bereichen Oberflächenreinigung, Kühlschmierung oder Beschichtung sind derartige Alternativen auch weder in Sicht noch scheinen sie für eine nachhaltige Metallwirtschaft grundlegend notwendig zu sein. Dagegen ist das Achten auf Qualitäten im Hinblick auf die Metallkreisläufe von außerordentlicher, leider derzeit aber noch fast völlig unterschätzter Bedeutung.

4.5.1 Grenzen der quantitativen Durchflussbetrachtungen

Bisher konzentrieren sich Stoffstrombilanzierungen und das darauf aufbauende Stoffstrommanagement auf die Quantitäten von Input-Output- bzw. Durchflussprozessen, sei es auf der Ebene von Produkten (als Sachbilanz im Rahmen von Ökobilanzen oder als Material Input per Service Unit (MIPS) im Rahmen der Bestimmung ihres ökologischen Rucksacks), von Betrieben (im Rahmen des Umweltmanagements bzw. des betrieblichen Stoffstrommanagements und Umweltcontrollings) oder auf der Ebene von Regionen und Nationen (als Material Flow Analysis MFA oder als auf den entsprechenden Raumebenen angesiedeltes Stoffstrommanagement). Gemessen und modelliert wird dabei im Allgemeinen nur der ‚Aufwand‘ bzw. Durchfluss, obwohl dabei Irreführenderweise auch schon oft vom ‚Verbrauch‘ die Rede ist. Selbstverständlich lassen sich auf der Basis einer Sachbilanz, eines bekannten und modellierten Aufwands bzw. Durchflusses, insbesondere aufgrund der dabei relativ genau bestimmbaren Emissionen und Abfälle, schon recht weit reichende Aussagen machen über die damit verbundenen Umweltwirkungen. Unter

⁵³ Insofern ist z. B. bei den Projekten von Sterr und seinen Mitstreitern im Heidelberger Raum die sukzessive Ausdehnung des Einzugsgebiets durchaus nachvollziehbar.

⁵⁴ Baumgärtner 2000, Müller-Fürstenberg 1995

Nachhaltigkeitsgesichtspunkten bleiben aber ganz wesentliche Aspekte unberücksichtigt.

Input-Output- bzw. einfache Durchfluss-Betrachtungen konzentrieren sich auf die Schnittstellen zwischen Öko- und Technosphäre. Wie viel wird aus der Natur entnommen und wie viel wird auf der anderen Seite wieder in sie zurückgegeben, als Emissionen in Luft, Wasser und Boden (Abfälle). Was qualitativ mit den Stoffen und Energien in der Technosphäre selbst geschieht, bleibt dabei allzu oft unberücksichtigt. Wie bei der Diskussion der Grenzen einer Effizienzstrategie schon angesprochen, liegen aber gerade im Umgang mit den Stoffen und Energien, also in der Prozess- und Produktgestaltung die weit reichendsten Innovationspotentiale in Richtung Nachhaltigkeit. Strategien, die sich auf die Schnittstellen zwischen Technosphäre und Ökosphäre konzentrieren, also insbesondere die Emissions-, Abfall- und die Ressourcenpolitik sind ohne Zweifel wichtige Elemente einer integrierten Nachhaltigkeitsstrategie. Die entscheidenden Veränderungen und Innovationen auf dem Weg zum nachhaltigen Wirtschaften betreffen aber nicht die Übergänge zwischen Techno- und Ökosphäre, sondern den Umgang mit Stoffen und Energien innerhalb der Technosphäre. Erst dort kommen Nutzungsmuster und Lebensstile in den Blick, die Entwicklung, Gestaltung und Nutzung von Produkten und Prozessen (vom prozess- und produktintegrierten Umweltschutz bis hin zu einer integrierten Produktpolitik IPP), die Technologiepolitik sowie die Bedingungen und die Reichweite von Innovationen. Wenn es stimmt, dass kleinschrittige Effizienzverbesserungen auf einem etablierten Technologiepfad für weit reichende Schritte in Richtung Nachhaltiges Wirtschaften alleine nicht ausreichen, wenn es um Pfadwechsel geht, um die integrierte Betrachtung von technischen (material-, prozess- und produktbezogenen), organisatorischen (Managementsysteme) und institutionellen Innovationen (Arrangements, Governance), dann muss dieser Bereich des Umgangs mit Stoffen und Energien in der Technosphäre aufgehellert werden.

4.5.2 Verbrauch als Qualitätsverlust

Ein Beispiel, das diesbezüglich im Projekt Nachhaltige Metallwirtschaft vertieft untersucht wurde, ist die Anreicherung von Störstoffen in den Metallkreisläufen, insbesondere von Störstoffen, die mit den absehbar verfügbaren Techniken nicht wieder aus ihnen entfernt werden können (dazu gehören insbesondere Kupfer und Zinn in Stahl und Aluminium). Diese Verunreinigungen gehen mit deutlichen ‚Verlusten an Nutzbarkeit‘ der jeweiligen Werkstoffe einher⁵⁵. Die Forderung nach einer Überwindung der bisher vorherrschenden rein quantitativen Durchflussbetrachtungen bei Stoffstrommodellierungen und beim Stoffstrommanagement bezieht sich also nicht nur auf die Aufhellung der Black Box, um z. B. beim ‚Umgang mit den Energien und Stoffen in der Technosphäre‘ weitergehende Effizienz- und Innovationspotentiale zu erschließen, sondern auch auf die qualitativen Aspekte des ‚Verbrauchs‘. Die Entropieproduktion dürfte in den meisten Fällen ein praktikables Maß dafür abgeben⁵⁶.

Mit Blick auf diese Qualitätsaspekte wird sich also in Zukunft noch einmal eine Schwerpunktsverschiebung und Erweiterung bei der Betrachtung, Modellierung und beim Management von Metallstoffströmen vollziehen müssen, von der Konzentration auf die Quantitäten der Metallkreisläufe hin zur stärkeren Berücksichtigung der erzeugten und insbesondere der recycelten *Metallqualitäten*.

4.5.3 Gefahrstoffe, Schadstoffe, ‚Rio‘Stoffe und Störstoffe

Rückblickend lässt sich feststellen, dass der Umwelt- und Nachhaltigkeitsdiskurs in den vergangenen 20-30 Jahren mit Blick auf Stoffe und Stoffströme schon mehrfach durch derartige Blick- und Themenwechsel zwischen eher qualitativen und eher quantitativen Betrachtungen geprägt wurde. Ein erster Blickwechsel führte von der zunächst alles

⁵⁵ Z. B. verliert Stahl mit zunehmender Verunreinigung durch Kupfer seine Tiefziehfähigkeit, vgl. detaillierter Kapitel 8.1 sowie Savov, Janke 1998 und 2004.

⁵⁶ Vgl. Kapitel 7

bestimmenden Gefahrstoffproblematik (also von der Toxikologie und ‚Chemiepolitik‘) zum Stoffstrommanagement und damit von der problematischen Qualität der Stoffe zur problematischen Quantität von Stoffströmen. Maßgeblich für diesen ersten Wechsel von der Schadstoffproblematik zur quantitativen Betrachtung von Stoffen bzw. Stoffströmen waren drei Gründe. Zum einen die Erfahrungen mit der Begrenztheit, wenn nicht gar Ohnmächtigkeit staatlichen Chemikalienregulation, die sich auf wissenschaftlich evidente Wirkungsnachweise zu stützen versucht. Sprichwörtlich hierfür wurde in Deutschland die so genannte ‚Altstoffproblematik‘. Stoffe die bei Inkrafttreten des Chemikaliengesetzes 1979 schon auf dem Markt waren, sollten nach dem Willen der Gesetzgeber nach und nach ebenso einer (öko)toxikologischen Prüfung unterzogen werden, wie dies für die Neustoffe, die neu entwickelten und angemeldeten Stoffe, gefordert wurde. Dieses Vorhaben hat sich aber aus verschiedenen Gründen praktisch mit wenigen Ausnahmen nicht realisieren lassen. Fehlende Ressourcen wie Geld, man-power, Infrastruktur und Zeit haben hier eine wichtige Rolle gespielt, aber auch Tierschutz und prinzipielle Erkenntnisschranken angesichts der Komplexität der möglicherweise exponierten Organismen und Ökosysteme. Zum anderen hat die Erfahrung eine wichtige Rolle gespielt, dass auch Umsatzerhöhungen von Stoffen, die aus (öko)toxikologischer Sicht eher unbedenklich sind, mit erheblichen ökologischen Folgen und Risiken verbunden sein können. Neben die Schadstoff- bzw. Gefahrstoffproblematik trat also die Problematik sehr großer Umsätze von Stoffen, die man qualitativ nicht als besonders problematisch bezeichnen würde, wie z. B. Wasser (incl. gelöste Salze), Kohlendioxid, Nährstoffe wie Nitrate und Phosphate aber auch Kies, Eisen und Stahl, Glas und Beton und dergleichen. Diese Gruppe von Stoffen, die in der Regel erst durch besonders große Stoffumsätze die Tragekapazitäten großer Systeme zu überschreiten droht (Bsp. Klima oder Großökosysteme) könnte man auch im Andenken an die Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro 1992 als ‚Rio‘-Stoffe bezeichnen. Zum Dritten wurde im Zuge des Nachhaltigkeitsdiskurses sozusagen in einer zweiten ‚Welle‘ nach der Debatte um die ‚Grenzen des Wachstums‘ Mitte der 70er Jahre (Meadows 1973) der Blick wieder auf die Problematik einer langfristigen Verfügbarkeit nichtregenerierbarer Ressourcen gelenkt.

In einer Verknüpfung dieser beiden Sichtweisen wird mittlerweile die Problematik der Ressourcenverfügbarkeit - also der Quellen – zur Problematik der Aufnahmekapazität der Senken für Emissionen und Abfälle in Beziehung gesetzt. So wird angesichts drohender anthropogener Klimaveränderungen darüber debattiert, ob wir aufgrund der Anreicherungen von CO₂ in der Atmosphäre als Folge der Verbrennung fossiler Energieträger, es uns noch überhaupt noch werden leisten können, alle verfügbaren fossilen Energieressourcen auch tatsächlich zu nutzen. Viel früher als das mögliche Versiegen der Öl-, Erdgas- und Kohle-Quellen, könnten die Grenzen der Tragekapazitäten der Senken, in diesem Fall also die Folgen der Anreicherung von CO₂ in der Atmosphäre, zum limitierenden Faktor werden. Dieser Perspektivwechsel wird auch der Debatte über die zukünftige Verfügbarkeit metallischer Ressourcen neue Impulse geben.

Die (öko)toxikologische Qualität von Stoffen geriet somit durch die Wende von der Chemiepolitik zur Nachhaltigkeit und zum Stoffstrommanagement etwas an den Rand der Debatte, doch die gesundheitlichen und ökologischen Gefahren und Risiken, die von Metallen und Begleitmetallen ausgehen, sind durchaus aktuell geblieben.

Der nun anstehende dritte wichtige Perspektivenwechsel bringt wieder qualitative Elemente in die Debatte zurück. Dabei geht es allerdings nicht vornehmlich um die (öko)toxikologischen Qualitäten und Wirkungen von Stoffen, sondern um Nutzbarkeit und technische Qualitäten. Es geht um das, was wir umgangssprachlich als ‚Verbrauch‘ bezeichnen, das ‚Vernutzen‘ von Wertstoffen, also die Minderung der Gebrauchstauglichkeit von Stoffen in der Gebrauchsphase. Dieser Aspekt ist für eine nachhaltige Metallwirtschaft von besonderem Interesse, weil die Metalle, von ihren physikalisch-chemischen Eigenschaften her, eigentlich praktisch ohne Qualitätsverluste eingesetzt und wiederverwertet werden könnten. Diese Option unterscheidet sie von den meisten Naturstoffen sowie von den meisten Kunststoffen, bei denen ein Qualitätsverlust in der Gebrauchsphase oder beim Recycling in der Regel unvermeidbar ist. Der nun anstehende Perspektivenwechsel fokussiert genau auf diese Problematik des Erhalts bzw. Verlustes der

technischen Qualitäten in den (Metall)Kreisläufen. Dabei spielen so genannte Störstoffe eine zentrale Rolle, also Verunreinigungen, die die Nutzbarkeit großer Metallströme einschränken. Derzeit wird dieses Problem noch in die Zukunft verschoben durch Verdünnung des belasteten Materials mit direkt aus dem Erz gewonnener ‚Frischware‘. Es wird somit erst wirklich virulent werden im Zuge des Versuchs, eine Nachhaltige Metallwirtschaft primär auf Metallrecycling aufzubauen. Für diesen anstehenden dritten Perspektivwechsel fehlt uns noch weitgehend das analytische Instrumentarium. Einen viel versprechenden Ansatz für die erforderlichen analytischen und modellierenden exakten (d. h. quantifizierenden) Betrachtungen und Bewertungen derartiger Qualitätseinbußen in den Stoffkreisläufen liefern Exergie- und Entropiebilanzen⁵⁷.

Trotz aller Unterschiede in den Sichtweisen und in den strategischen Schlüssen, die daraus gezogen werden, eine der wesentlichen Voraussetzungen für Strategien in Richtung Nachhaltigkeit mit Blick auf Stoffe und Stoffströme ist deren Erfassung und Modellierung. Die in Unternehmen oft gehörte Aussage „was nicht gemessen werden kann, kann auch nicht gemanaged werden“, mag in ihrer Zuspitzung übertrieben sein. Auf jeden Fall eröffnen Stoffstrombilanzen (Sachbilanzen) und (statische oder dynamische) Stoffstrommodelle unbestritten eine ganze Reihe von wertvollen Erkenntnissen und strategischen Ansatzpunkten.

4.6 Stoffstrommodelle als Informationsgrundlage von Nachhaltigkeitsstrategien

Die systematische Erfassung und Modellierung von Metallkreisläufen, sowie der mit ihnen verbundenen Begleit- und Nebenstoffströmen geben Hinweise und ansatzweise Antworten auf zentrale Fragen aus allen drei Dimensionen der Nachhaltigkeit. Die Einträge von Metallen (nicht nur aber vor allem auch von toxischen Schwermetallen) in Ökosysteme sind relevant für die ökologische Dimension und die Umweltpolitik. Die damit möglicherweise verbundenen Kontaminationen von Trinkwasser und Nahrungsmitteln sind unter gesundheitlichen Aspekten, also sozial relevant, aber auch ökonomisch unter dem Aspekt der irreversiblen Anreicherung und der damit verbundenen Zerstörung bzw. Entwertung von ‚Naturkapital‘ mit Blick auf zukünftige Generationen. Die Metallumsätze, -verbräuche und die langfristige Ressourcenverfügbarkeit interessieren in der ökonomischen Dimension aber auch in der sozialen nicht zuletzt unter dem Aspekt der intergenerationellen Gerechtigkeit. Mögliche Effizienzgewinne und Verbesserungen der Ressourcenproduktivität interessieren damit nicht nur aus betriebswirtschaftlicher, sondern insbesondere auch aus volkswirtschaftlicher Sicht.

Zum Zweck einer integrativen lebenszyklusübergreifenden quantitativen Erfassung und Darstellung wurde und wird das Instrumentarium der Stoffstromanalyse und -modellierung entwickelt. Vorbilder für derartige Modelle stammen insbesondere aus der Ökosystemtheorie. Dort wurden schon in den 70er Jahren die durch Ökosysteme hindurch fließenden natürlichen Kohlenstoff- oder Stickstoffströme als biogeochemische Kreisläufe mit unterschiedlichem Raumbezug (von regional bis global) untersucht (vgl. z. B. Odum 1983 S. 133 ff.). Die anthropogenen Stoffflüsse, welche mittlerweile die natürlichen in vielen Bereichen bei weitem übersteigen⁵⁸, rückten erst im Zusammenhang mit dem Nachhaltigkeitsdiskurs ins Zentrum des Interesses. Auch dabei wurde auf Konzepte aus der Ökosystemtheorie zurückgegriffen, insbesondere auf das Konzept der Tragkapazitäten (carrying capacities). Das Interesse konzentriert sich nun einerseits im Output-Bereich auf die assimilativen Tragkapazitäten anthropogen überformter Ökosysteme (resilience)⁵⁹ sowie im Input-Bereich auf die langfristige Verfügbarkeit biogener und geogener

⁵⁷ Vgl. Ayres 2004, Rechberger 2002, Gößling-Reisemann 2004. Wir werden in den Kapiteln 7 sowie 8.1 genauer darauf eingehen.

⁵⁸ Vgl. z. B. Baccini; Baader 1996

⁵⁹ Vgl. z. B. Holling 1973 und 1986

Ressourcen⁶⁰.

Unter Obertiteln wie ‚Material Flow Accounting‘ (MFA) bzw. ‚Substance Flow Accounting‘ (SFA) werden derzeit derartige Modelle des anthropogenen Stoffwechsels entwickelt, insbesondere auf der Ebene von Wirtschaftsregionen und Nationen⁶¹. Vergleichbares leisten mit Blick auf bestimmte Produkte bzw. Produktionsprozesse die Sachbilanzen (inventories) im Rahmen von Ökobilanzen und die betrieblichen Stoffstromanalysen im Rahmen von Öko-Audits⁶². Der ständig wachsende Datenbestand wird inzwischen auch im Rahmen mehrerer Initiativen im Hinblick auf Systematisierung, Kompatibilität und Aktualität optimiert⁶³.

Für die im Projekt ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ aufgeworfenen Fragen nach Problemen, Perspektiven und Lösungsansätzen in den verschiedenen Raum- und Zeitdimensionen spielen somit Betrachtungen von Metallströmen bzw. -kreisläufen über den gesamten Produktlebenszyklus, von der Rohstoffförderung über die Metallproduktion, die Produktherstellung, Produktnutzung und die Entsorgung bzw. das Recycling eine zentrale Rolle. Statische und sofern leistbar auch dynamische Modelle dieser Stoffströme eröffnen dann wichtige Hinweise auf:

- Entwicklungen des Ressourcen‘verbrauchs‘ und der Ressourcenverfügbarkeit
- Die Akkumulation von Metallvorräten in der Technosphäre, in den v. a. durch Produkte und Schrotte gebildeten technischen Reservoiren (den sog. ‚stocks‘)
- Tatsächliche Recyclingraten
- Die Größenordnungen von dissipativen Verlusten in die Umwelt und in andere anthropogene Stoffströme sowie die ‚Stellen‘, an denen sie auftreten
- Schwachstellen (besonders hohe Verbräuche und Verluste) und somit ggf. besonders geeignete Ansatzpunkte für Effizienzsteigerungen
- Abschätzbare Wirkungen von (möglichen) Maßnahmen des ‚Stoffstrommanagements‘.

Auch wenn die Probleme der Datenverfügbarkeit, -aktualität und –differenziertheit nach wie vor immens sind, konnten weltweit mittlerweile schon für eine ganze Reihe von Metallen Modelle in den verschiedensten räumlichen und zeitlichen Auflösungen entwickelt werden. Zu den am weitesten fortgeschrittenen Arbeiten dürften derzeit Modelle von Aluminium- und Kupferkreisläufen in den verschiedensten räumlichen Bezugsgrößen gehören⁶⁴.

Im Rahmen unseres Forschungsprojektes konnten immerhin zwei Beiträge zur Bilanzierung und Modellierung von Metallstoffströmen geliefert werden. Da uns ein nationales Modell der Stahlkreisläufe nicht zur Verfügung stand - wir müssen nach intensiver Recherche davon ausgehen, dass es bisher noch keines gibt - haben wir ein einfaches Modell entwickelt, um damit perspektivisch die Akkumulation des Störstoffes Kupfer bei unterschiedlichen Recyclingraten über einen längeren Zeitraum simulieren zu können. Außerdem wurde mit der Entropiebilanz der Kupfererzeugung am Beispiel der Norddeutschen Affinerie ein wichtiger Schritt in Richtung auf die Integration der qualitativen und für die Nachhaltigkeitsdebatte zentralen Verbrauchsaspekte gemacht.

⁶⁰ Vgl. z. B. Daily, Ehrlich 1992

⁶¹ Begleitet wird das Ganze auch von einer intensiven methodischen Diskussion, vgl. z. B. Baccini, Brunner 1991; Baccini, Baader 1996; Adriaanse u. a. 1997; Matthews et al 2000; Bringezu 2000 sowie die Beiträge im ConAccount-Netzwerk www.conaccount.net

⁶² Vgl. z. B. Schmidt, Schorb 1995 und Eyerer 1996. Die Bilanzierung und Modellierung von Stoff- und Energieströmen in Ökobilanzen wird inzwischen durch eine ganze Reihe von kommerziellen Softwaretools wie z.B. GaBi™ oder Umberto™ unterstützt.

⁶³ Vgl. z. B. die Ecoinvent-Initiative in der Schweiz (www.ecoinvent.ch) und das Netzwerk Lebenszyklusdaten in Deutschland (www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de).

⁶⁴ Vgl. dazu die Arbeiten im Sonderforschungsbereich 525 ‚Ressourcenorientierte Gesamtbetrachtung von Stoffströmen metallischer Rohstoffe‘ (<http://sfb525.rwth-aachen.de>) sowie die Arbeiten in Yale um Thomas Graedel: Graedel et al 2002; Bertram et al 2002; Spataro et al 2002

4.6.1 Zur Rolle von Stoffstrommodellen in der Kommunikation über Langfristprobleme- Das Beispiel Kupfer als Störstoff im Stahlkreislauf

Neben den dissipativen Verlusten von Metallen in die Ökosphäre, die ja in doppelter Hinsicht schmerzlich sind – als Verlust wertvoller Ressourcen und als Kontamination von Organismen und Ökosystemen - rückt in jüngster Zeit ein zweiter Aspekt des ‚Verbrauchs‘ von Metallen in den Fokus, nämlich Einbußen bei der Nutzbarkeit bestimmter Metallqualitäten. Bestimmte Störstoffe, so genannte ‚tramp elements‘ - am bekanntesten sind diesbezüglich Kupfer und Zinn gelöst in Stahl oder Aluminium – aber auch bewusst und gezielt beigemengte Legierungsbestandteile können mit den derzeitigen technisch-ökonomischen Möglichkeiten nicht wieder aus den Metallschmelzen entfernt werden. Dies führt zu einer tendenziellen Akkumulation dieser Störstoffe im Zuge des Metallrecyclings. Dieser Tendenz zur Akkumulation von Verunreinigungen im Metallkreislauf durch Schrotteinsatz stehen in der sich weiter entwickelnden technischen Praxis immer höhere Anforderungen an die Reinheiten bzw. an definierte maßgeschneiderte Legierungsqualitäten gegenüber.

Auf die Unterscheidung zwischen unmittelbar wahrnehmbaren und die Menschen jetzt bewegenden Nachhaltigkeitsproblemen von sehr weit reichenden, aber schleichend sich verschärfenden, Nachhaltigkeitsproblemen wurde schon mehrfach hingewiesen. Im Zusammenhang mit der Debatte über Erfolg versprechende Strategien soll nun auch auf die praktischen Probleme in Unternehmenskooperationen hingewiesen werden, wenn es darum geht, den Blick und die Aufmerksamkeit auf diese Langfristprobleme zu lenken, von denen derzeit noch kein aktueller Problemdruck ausgeht. Der Wissenschaft kommt hier wie erwähnt eine wichtige Aufgabe bei der Erforschung und Verdeutlichung derartiger Problemdynamiken zu. In einem Teilprojekt im Rahmen des Projektes ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘, das sich mit der Verunreinigung des Stahlkreislaufs mit dem Störelement Kupfer beschäftigte, ist uns genau dies gelungen. Dies war aber nur möglich geworden auf der Basis mehrerer von uns erst zu schaffender Voraussetzungen.

Das Problem der Verunreinigungen ist an sich schon lange bekannt. In jeder metallurgischen Grundvorlesung wird es angesprochen. Praktisch haben vor allem die vorwiegend auf Schrottbasis produzierenden Elektrostahlwerke und die Sekundäraluminiumwerke damit zu kämpfen. Sie ‚lösen‘ das Problem bisher erfolgreich entweder durch Verdünnung mit ‚Frischware‘ (um so die Grenzwerte für die ökonomisch interessanteren besseren Qualitäten noch einhalten zu können) oder durch das gezielte Ausschleusen des verunreinigten Sekundärmaterials in Verwendungszusammenhänge mit geringeren Reinheitsanforderungen. Die gängige Praxis verschiebt also die Problematik in die Zukunft. Dies ist alles andere als nachhaltig und ein typischer Fall von Kostenexternalisierung.

Eine erste wesentliche Voraussetzung zur Verdeutlichung der tatsächlichen Schärfe der Problematik war ein zunächst mehr oder minder ‚gegriffenes‘ (aber offenbar von allen Akteuren ohne weiteres akzeptierbares⁶⁵) Zielszenario einer ‚Nachhaltigen Metallwirtschaft‘. Diese sollte im Jahre 2050 in der Lage sein, nur noch die unvermeidbaren dissipativen Verluste auszugleichen, also auf der Basis von ca. 90% Recyclingmaterial arbeiten können. Mit dieser ‚Setzung‘ bzw. mit diesem ‚Szenario‘ wurde der bisher praktizierten Verdünnungsstrategie der Ausweg verstellt.

Zur Verdeutlichung der Problematik wurde ein grobes Modell des nationalen Stahlkreislaufs für Deutschland erarbeitet. Mit Hilfe dieses Modells konnten dann gezeigt (simuliert) werden, wie sich die Störstoffe im nationalen Stahlhaushalt der Technosphäre (national stock) über die Zeit dramatisch akkumulieren. Es konnten auch verschiedene Szenarien grob durchgespielt, und die erwartbaren Wirkungen verschiedener Maßnahmen abgeschätzt werden. Im vorliegenden Fall ging das soweit, dass es sich in einigen worst case Szenarien sogar empfahl, bestimmte stark verunreinigte Schrottfractionen ganz aus dem Kreislauf herauszunehmen und zu ‚deponieren‘, um innerhalb bestimmter gerade noch tolerierbarer

⁶⁵ Die 90% ige Recyclingquote wurde erstaunlicherweise bisher in ihrer Sinnhaftigkeit für derartige Modellüberlegungen weder von Wissenschaftlern noch von Praktikern prinzipiell in Frage gestellt.

Grenzwerte für Störstoffe in den großen Stahlflüssen zu bleiben.

Das Modell selbst war zugegebenermaßen noch sehr grob und auch die auf seiner Basis möglichen Szenarien voller Unsicherheiten. Hier kann und muss in Zukunft noch viel Arbeit investiert werden, wenn man zu präziseren Aussagen kommen will. Trotzdem hatte dieses nationale Stahlmodell auch schon in dieser völlig unzulänglichen Form eine wichtige, sozusagen ‚didaktische‘ Funktion. Die einzelnen Werte evtl. sogar deren Größenordnungen werden sich bei einer Verfeinerung sicher noch ändern, aber das Modell hat wesentliche Zusammenhänge und mögliche langfristige Dynamiken verdeutlicht, die in ihrer Problematik so bisher noch nicht erfasst worden sind⁶⁶. Anlässlich eines Workshops mit den Akteuren des automobilbezogenen Stahlkreislaufs, auf dem diese Szenarien vorgestellt wurden, ist für alle Beteiligten deutlich geworden, dass hinsichtlich der Verunreinigungen etwas geschehen muss, wenn man das Ziel einer im Wesentlichen auf Recyclingmaterial aufbauenden Nachhaltigen Metallwirtschaft erreichen will. An dem Workshop waren neben Metallurgen und Verbandsvertretern Akteure aus allen Stationen des Stahlkreislaufs beteiligt, angefangen vom Automobilbau als wesentlichem Verbraucher von Tiefziehstahl, über die Demontagebetriebe für Altautos, die Schredderbetriebe, der Schrotthandel bis hin zu den Elektrostahlwerken. Auch eine zu Beginn des Workshops vorgetragene Darstellung der bisher nur im Labormaßstab realisierbaren Reinigungsmöglichkeiten der Stahlschmelze von den Störstoffen im Hochvakuum⁶⁷ war wichtig, weil mit ihr noch einmal deutlich wurde, dass auf absehbare Zeit keine praktisch und ökonomisch realistische Möglichkeit in Sicht ist, das Problem im Nachhinein ‚technisch‘ zu lösen. Und weil alle wesentlichen Akteure anwesend waren, half auch das bisher so beliebte Spiel hier nicht mehr weiter, die Verantwortung und die Aufforderung zum Handeln den jeweils anderen Akteuren in der Kette zuzuschieben.

Diese Modell gestützte Form der Aktualisierung und Verdeutlichung einer bisher kaum wahrnehmbaren schleichenden Problematik und die schlagartige Erkenntnis, dass das Problem nur im Zusammenspiel aller Akteure in der Kette zu lösen ist, machten also die wesentlichen Erfolge dieses Workshops aus. Erst auf dieser Basis konnte eine rationale Debatte darüber beginnen, wie viel und was genau jeder einzelne der Akteure zur Erreichung des gemeinsamen Ziels auf jeder einzelnen Stufe beigetragen kann und muss.

⁶⁶ Zur Entwicklung, zum Einsatz und zur Funktion von derartigen Modellen im Rahmen des Stoffstrommanagements wird derzeit eine weitere direkt auf diesen Projektergebnissen aufbauende Dissertation erarbeitet, vgl. Gottschick. 2002, Gottschick, von Gleich, Sander 2003, Gottschick 2003

⁶⁷ Vgl. dazu auch den Beitrag von Savov und Jahnke 2004

5 Nachhaltigkeitsstrategien im Praxistest

Nachhaltiges Wirtschaften ist ein umfassendes, komplexes und langfristiges Ziel. Wege zum Nachhaltigen Wirtschaften beziehen sich auf Zeiträume, die im alltäglichen Handeln sowie bei politischen und ökonomischen Entscheidungen nur selten eine Rolle spielen.

Nachhaltiges Wirtschaften ist als positives Ziel nicht ein für alle mal auszuformulieren. Es ist daher einfacher, Verhältnisse und Trends zu bestimmen, die nicht nachhaltig sind. Unsere besondere Aufmerksamkeit verdienen zudem diejenigen Nachhaltigkeitsdefizite, die eher schleichend daher kommen, die akut keine Betroffenheit auslösen, die aber, wenn sie erst einmal zum Durchbruch gekommen sind, kaum noch bewältigbar sind, insbesondere anthropogene Klimaveränderungen, der Verlust an Biodiversität, die Akkumulation persistenter Schadstoffe und die langfristige Verfügbarkeit energetischer und stofflicher Ressourcen⁶⁸.

Jede Nachhaltigkeitsstrategie hat vor diesem Hintergrund mit zwei großen Problemen zu kämpfen. Sie muss den Blick auf diese langfristigen Problementwicklungen lenken (Betroffenheit erzeugen), und es muss ihr gelingen, konkrete Schritte aufzuzeigen, die als angemessener Lösungsbeitrag nicht nur für aktuelle, sondern eben auch für diese langfristigen Probleme verstanden werden können. Es kommt also darauf an, die Zukunft in die Gegenwart zu holen, die Zukunftsprobleme zu ‚aktualisieren‘ und zugleich darauf zu achten, dass die aktuell meist nur möglichen kleinen Lösungsschritte, noch als angemessene Beiträge zur Lösung der großen und langfristigen Probleme verstanden werden können.

Doch nicht nur die zeitliche, auch die räumliche Dimension der Nachhaltigkeitsdefizite bereitet praktische Probleme. Das Projekt ‚Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stoffströmen in der Region Hamburg‘ (Kurztitel: ‚Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg‘) war als regionales Projekt angelegt, ganz im Sinne der Maxime ‚Global Denken – lokal bzw. regional Handeln‘. Die oben genannten relevantesten Nachhaltigkeitsdefizite reichen aber nicht nur weit in die Zukunft hinein, sie sind im Kern auch globaler Natur. So wie sich mit Blick auf die Langfristigkeit der Problemlagen die Aufgabe einer angemessenen zeitlichen Einordnung stellt (Aktualisierung und zugleich den Aufrechterhaltung des Langfristbezugs), so geht es mit Blick auf den Raumbezug um die Frage nach der angemessenen räumlichen Handlungsebene für die Problemlösungsstrategien. Im Projektansatz wurde die regionale Handlungsebene gewählt.

5.1 Nachhaltigkeitsdefizite der Metallwirtschaft in Hamburg und darüber hinaus

Wenn man Nachhaltigkeitsstrategien in Kooperation mit Unternehmen zu entwickeln versucht, ist es besonders deutlich, doch prinzipiell gilt: Ein wichtiger Aspekt der **ökonomischen Dimension der Nachhaltigkeit** ist (als unhintergehbare Mindestvoraussetzung) die (internationale) Wettbewerbsfähigkeit und Innovationsfähigkeit von Unternehmen, Regionen und Branchen. Die Innovationsfähigkeit von Unternehmen, Branchen und Regionen ist einerseits ein ganz wesentliches Element der (strategischen, längerfristigen) Wettbewerbsfähigkeit. Sie ist zugleich eine der Grundvoraussetzungen für die Fähigkeit zum Umbau unseres Wirtschaftens und Lebens in Richtung Nachhaltigkeit. Aus einer die Wertschöpfungsketten übergreifenden Perspektive erscheinen die Defizite in der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit der Metallwirtschaft der Metropolregion Hamburg allerdings als relativ gering im Vergleich zu den ökonomischen Struktur- und

⁶⁸ Mit der Klima-, der Biodiversitäts- sowie der Ressourcenproblematik waren es auch solche erst durch wissenschaftliche Forschungen richtig deutlich werdende Probleme, die schon die Thematik der Konferenz von Rio 1992 mit bestimmten.

Wettbewerbsproblemen der entsprechenden Sektoren in den Entwicklungs- und Schwellenländern, aus denen ein Großteil der in Hamburg verarbeiteten Rohstoffe stammt, und in die auch ein Teil der Produkte fließt.

Neben den eher kurzfristigen und aktuellen Problemen der ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit, geht es beim Thema ‚ökonomische Nachhaltigkeit‘ allerdings vor allem um die Langfristsicherung der wirtschaftlichen Basis von Regionen und Nationen. Im Zentrum steht dabei die Fähigkeit zur Reproduktion der Bestandsgrundlagen dieser sozio-ökonomischen Systeme, also ihrer natürlichen Ressourcen (rohstofflich-materielle, energetische und ökosystemare), ihrer sozialen und institutionellen Ressourcen (Staat, Rechtssystem, Sozialsystem) sowie ihrer Humanressourcen (Arbeitskräfte, Qualifikationen, soziale Stabilität, Gesundheit und kulturelle Identität). Die Selbstreproduktion von Systemen in einer dynamischen Umgebung – insbesondere unter den Bedingungen eines sich durch Globalisierung und Marktsättigung immer weiter verschärfenden Wettbewerbs -, setzt dabei ganz wesentlich die Fähigkeit zur Selbstveränderung, zur Innovation voraus. In den Erzförderländern geht es in diesem Zusammenhang auch darum, sich rechtzeitig auf die Situation vorzubereiten, wenn nationale Lagerstätten erschöpft (bzw. nicht mehr konkurrenzfähig) sein werden⁶⁹.

Mit dem Hinweis auf die Probleme in den Erzförderländern sind auch schon bedeutende Elemente der **sozialen Dimension der Nachhaltigkeit** angesprochen. Zu den wichtigsten aktuellen sozialen Problemen der weltweiten Metallwirtschaft gehören ohne Zweifel die sozialen Verwerfungen, die mit dem Rohstoffabbau in nicht nur ökologisch, sondern gerade auch sozial und kulturell hochsensiblen Gebieten wie z. B. im Amazonasbecken oder in Papua Neuguinea verbunden sind.

Trotzdem muss die Aufmerksamkeit auch in der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit stärker auf die langfristigen und nicht so unmittelbar wahrnehmbaren Probleme der intergenerationellen Gerechtigkeit gelenkt werden, insbesondere auf die Frage nach dem ‚Erbe‘, das wir heutigen Generationen den zukünftigen Generationen hinterlassen werden. Die Problematik der langfristigen Verfügbarkeit und auch der räumlichen Verteilung metallischer Ressourcen spielt hierbei eine wichtige Rolle. Auf eine ganze Reihe von Fragen gilt es hier Antworten zu finden: Wie lange werden die Erzressourcen reichen? Was bedeutet es für die derzeitigen Rohstoffländer ökonomisch und sozial, wenn ihre nationalen (primären) Ressourcen ‚erschöpft‘ sind? Was ist unter einer ‚Erschöpfung‘ von Erzressourcen eigentlich genau zu verstehen? Was bedeutet es in der ökonomischen und ökologischen Dimension, wenn immer ärmere Erze abgebaut werden müssen? Was bedeutet es, wenn auf der anderen Seite in den Industrienationen ein wachsender Vorrat an recycelbaren Metallen akkumuliert wird und somit bisher rohstoffarme Länder plötzlich zu ‚rohstoffreichen‘ Ländern werden? In welcher Qualität werden bzw. können wir diesen in der Technosphäre akkumulierten ‚Metallvorrat‘ an nachfolgende Generationen vererben?

Mit Blick auf das langfristige Nachhaltigkeitsziel dürften diese aktuell nicht so drängenden Nachhaltigkeitsdefizite zu den bedeutsameren gehören. Die fehlende unmittelbare Wahrnehmbarkeit und Akutheit ist dabei ein nicht zu unterschätzendes Problem bei der Entwicklung von praktischen Lösungsstrategien. Gerade bei solchen nicht unmittelbar wahrnehmbaren, aber in der Konsequenz weit reichenden und oft irreversiblen Entwicklungen und Problemen stellt sich sehr schnell die Frage, inwieweit bzw. wie sie im Rahmen von Kooperationen mit regionalen Unternehmen der Metallwirtschaft ‚zur Sprache gebracht‘ und gemeinsam angegangen werden können.

Selbstverständlich gehören zu den sozialen Nachhaltigkeitsdefiziten auch die nach wie vor in der Region Hamburg mit der Metallherstellung und -verarbeitung aktuell verbundenen Probleme des Arbeits- und Gesundheitsschutzes. In den Industrienationen wurden diesbezüglich allerdings – ebenso wie im Umweltschutz – in den vergangenen Jahrzehnten immense Fortschritte erzielt. Deshalb gilt auch hier: Die Hauptprobleme des Arbeits- und Gesundheitsschutzes der Metallwirtschaft liegen nicht (mehr) in der Region Hamburg, sie

⁶⁹ Zum Phänomen der so genannten ‚Dutch Disease‘ vgl. Messner 2004

liegen - genauso wie bei der Erzgewinnung und -verarbeitung - in den Entwicklungs- und Schwellenländern, die diese Verarbeitungsschritte im Zuge der Sicherung einer nationalen Wertschöpfung zunehmend übernehmen wollen. Aber auch in den Industrienationen gilt es aber, ein durchaus problematisches Erbe vergangener ‚Sünden‘ im Auge zu behalten. Metalle – insbesondere die mit den Hauptmetallströmen fast immer assoziierten Schwermetalle - sind toxikologisch und ökotoxikologisch überaus problematisch⁷⁰. Gerade die Schwermetallbelastung ist eben nicht nur ein *aktuelles* toxikologisches Problem. Aufgrund der Anreicherung in der Umwelt und in der Nahrungskette existiert hier ein kontinuierlicher Übergang zu den weniger wahrnehmbaren langfristigen und irreversiblen Nachhaltigkeitsproblemen. Auch viele der mit der Metallerzeugung und Metallverarbeitung verbundenen Begleitstoffströme, dazu gehören insbesondere der Abraum (overburden), die Schlämme der Aufbereitungsanlagen (tailings), die Emissionen der Metalle erzeugenden Betriebe einschließlich der Schlacken und Filterstäube sowie die Nebenstoffströme, z. B. die gegen Korrosion aufgetragenen Beschichtungen, bekommen erst mit dem Übergang zu derartigen Langfristintoxikationen ihre weiter reichende Nachhaltigkeitsrelevanz. Aus dieser Perspektive gehört selbst die Kühlschmierstoffproblematik, die in einem Teilprojekt intensiver bearbeitet wurde, eher zu den kleineren und im großen Ganzen reversiblen Problemen, auch wenn gerade an diesem Beispiel Lösungsbeiträge in allen drei Dimensionen der Nachhaltigkeit erbracht werden konnten.

Mit dem Blick auf Schwermetallanreicherungen in der Umwelt wird schon zur **ökologischen Dimension der Nachhaltigkeit** übergeleitet. Auch in dieser Dimension liegen – aufgrund gewaltiger Fortschritte im Umweltschutz in den Industrienationen - die größten *aktuellen* Defizite heutzutage in den Entwicklungs- und Schwellenländern. Sie sind dort insbesondere verbunden mit dem Erzabbau und mit einer Form der industriellen Konzentratherstellung (zum Teil auch zusätzlich der Metallerzeugung), die in vielen Fällen noch keineswegs den Standards entspricht, die in den westlichen Industrienationen inzwischen vorherrschen. Wobei nicht verschwiegen werden sollte, dass im Hinblick auf die Einhaltung derartiger Standards sich durchaus auch noch ein Blick lohnt auf so manchen Standort in westlichen Industrienationen und erst recht in einigen osteuropäischen Ländern. Aktuell am Dringendsten und Gravierendsten ist aber die Situation in vielen Minen. Der vorherrschende großflächige Tagebau stellt einen tiefen Eingriff dar in die regionalen Ökosysteme. Solche Eingriffe sind umso gravierender, je sensibler diese Systeme sind, in die eingegriffen wird, wobei tropische Regenwälder und die meisten aquatischen Systeme (Süßwassersysteme und Küstenzonen) als besonders verletzlich gelten. Hinzu kommen quantitativ und zum Teil auch qualitativ, d. h. (öko)toxikologisch, bedeutsame Abfall- und Abwasserströme sowie die Emissionen entlang der Metallerzeugungskette mit ihren ökotoxikologischen, insbesondere (aber nicht ausschließlich) die Schwermetalle betreffenden, Wirkungen, ihrem Versauerungspotential (Saurer Regen) und ihrem Beitrag zum Treibhauseffekt. Auch hier sind unter dem Langfristaspekt der Nachhaltigkeit diejenigen ökologischen Probleme besonders hoch zu gewichten, die irreversible und ggf. auch globale Effekte nach sich ziehen. Dazu gehören ohne Zweifel die Biodiversitätsproblematik (besonders virulent wiederum in den Erzabbaugebieten), die stratosphärische Ozonzerstörung (relevant wohl nur noch in einigen Spezialanwendungen bei der Oberflächenreinigung) sowie entlang der gesamten Produktlinie einschließlich des Recyclings, die Akkumulation von Schwermetallen und nicht zuletzt der eng mit dem Energieverbrauch gekoppelte Treibhauseffekt⁷¹.

⁷⁰ Vgl. z. B. Merian 1984, van der Voet et. al. 2000

⁷¹ Einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zum Treibhauseffekt leistet im übrigen auch Schwefelhexafluorid, SF₆, das als Schutzgas in der Aluminium- und Magnesiumindustrie eingesetzt wird.

5.2 Die Innovationsstrategie - Wettbewerbsfähigkeit durch Nachhaltigkeitsorientierung

Die bisher diskutierten Triple-win-Strategien Verbesserung der ‚Ressourceneffizienz‘ und ‚Erhöhung der Konsistenz‘ sollten, wenn möglich, parallel verfolgt bzw. kombiniert werden. Das Verfolgen dieser Strategien erscheint auf den ersten Blick als der Königsweg für die Umsetzung des Nachhaltigkeitsziels im stofflichen Bereich vor allem in der bei uns im Mittelpunkt stehenden Kooperation mit Unternehmen. Beide Strategien sind aber auf die Innovationsfähigkeit von Unternehmen angewiesen.

Zur Umsetzung sowohl der Effizienz- als auch erst Recht der Konsistenzstrategie müssen die Unternehmen in der Lage sein, die notwendigen Veränderungen (Innovationen) durchzuführen. Insbesondere die Konsistenzstrategie stellt eine große Herausforderung an die Unternehmen dar, weil hier oft nicht nur Verbesserungen auf einem Technologiepfad (bzw. entlang einer Produktlinie) gefordert sind, sondern Pfadwechsel. Die Innovationsfähigkeit muss daher als Voraussetzung der beiden Strategien betrachtet werden. Die Innovationsstrategie konzentriert sich auf diesen Aspekt und eröffnet damit einen wesentlich breiteren und weitreichenderen Zugang zu den Unternehmen. Im Zuge des Projektverlaufs verschob sich der Schwerpunkt des Projektansatzes immer mehr vom ursprünglichen an der Effizienzstrategie orientierten Stoffstrommanagement zur Innovationsstrategie. ‚Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit durch Nachhaltigkeitsorientierung‘ erwies sich als der fruchtbarste Ansatz in den Unternehmenskooperationen.

Ein wesentlicher Grund für die Fruchtbarkeit der Innovationsstrategie ist in veränderten Rahmenbedingungen auf den Märkten und damit verbunden dem großen Bedeutungszuwachs der Öffentlichkeit für den Unternehmenserfolg zu suchen. Auf den globalisierten, wettbewerbsintensiven Märkten kommt es darauf an, nicht nur preisgünstiger zu sein, sondern auch qualitativ besser als die Mitbewerber. Es geht darum, Kundenwünsche optimal zu befriedigen und damit Kunden an das Unternehmen zu binden, Märkte zu halten und möglichst neue Märkte zu erschließen. Dieser *Qualitätswettbewerb* spielt auf fast allen Märkten neben dem Kostenwettbewerb eine zunehmend wichtige Rolle. Für Unternehmen am Standort Bundesrepublik Deutschland, einem Hochlohnland mit hoher Steuerbelastung, hohen Umweltstandards, hohen Energiepreisen und weitestgehend ohne eigene billige Rohstoffe, ist die Qualitätskonkurrenz auf den meisten Marktsegmenten wichtiger als die Kostenkonkurrenz. Was als „Qualität“ zu verstehen ist, bestimmt dabei im Wesentlichen der Kunde. Bei vergleichbaren Preisen und vergleichbarer technischer Qualität verschiedener Wettbewerber können die verschiedensten zusätzlichen Aspekte kaufentscheidend werden, angefangen vom Design, der Liefertreue, über den Service bis hin zur Umwelt- und sozialen Performance des Unternehmens und damit auch zu seiner Nachhaltigkeitsstrategie.

Innovationen erscheinen angesichts der ‚Trägheit‘ der Systeme als eher unwahrscheinlich. Aber sie finden doch immer wieder statt. Die entscheidende Antriebskraft zur Wissensgenerierung und Innovation, zur ständigen Verbesserung und Flexibilisierung ist der Wettbewerb. Es ist also nahe liegend, dieses effiziente Verfahren auch in den Dienst der Erreichung konkreter Nachhaltigkeits-Ziele zu stellen. Wenn es um die Wettbewerbs- und Innovationsfähigkeit von Unternehmen geht, stellt sich die Frage, wie diese gestärkt werden können. Verschiedene wissenschaftliche Disziplinen haben dazu eine Reihe von Konzepten entwickelt, die sowohl „Anforderungen an Unternehmen“ als auch „Anforderungen an das institutionelle Umfeld“ erfassen (Hinterberger 1998: 86). Klar ist, dass Wettbewerbsfähigkeit nicht spontan entsteht oder kausal auf bestimmte Rahmenbedingungen oder unternehmerisches Wirken zurückzuführen ist. Es handelt sich vielmehr um eine ‚systemische Qualität‘, ein interdependentes Zusammenspiel von Unternehmen, Staat, intermediären Institutionen und der Lernfähigkeit der Gesellschaft (Hinterberger 1998: 86). Im Projekt wird dieses Zusammenspiel mit dem Konzept von ‚Innovationssystemen‘ zu fassen versucht. Die Innovationsfähigkeit von Unternehmensclustern wird demgemäß maßgeblich bestimmt durch die Fähigkeit einer großen Anzahl verschiedenster Akteure zum

erfolgreichen Zusammenwirken in so genannten Innovationssystemen. Die so genannte Porter-Hypothese spielt dabei eine wichtige Rolle, nämlich die These, dass räumlich Nähe für das Funktionieren ‚regionaler Innovationssysteme‘ eine hohe Bedeutung hat, und dass insofern der Weltmarkterfolg vieler Unternehmen ‚home based‘, also auf die Bedingungen im regionalen Innovationssystem zurückzuführen ist⁷².

Als Motiv von Unternehmen für Kooperationen in Richtung Nachhaltigkeit wird bei der Innovationsstrategie also insbesondere auf die Sicherung der Märkte, bzw. auf die ‚Eroberung‘ neuer Märkte gesetzt. Es geht mehr um eine ‚Steigerung der Erlöse‘ als um die ‚Senkung der Kosten‘, letzteres steht ja eher bei der Effizienzstrategie im Zentrum. Nicht zu unterschätzen ist in diesem Zusammenhang auch der *Modernisierungsimpuls*, der von der Entwicklung und Durchsetzung einer Nachhaltigkeitsstrategie im Unternehmen selbst ausgeht. Ähnlich wie bei der Einführung eines Qualitäts- oder Umweltmanagementsystems wirkt es sich positiv für die Fitness eines Unternehmens aus, wenn es ihm gelingt, eingefahrene Routinen, Ausrichtungen und Verantwortlichkeiten immer wieder in Frage zu stellen, Impulse von außen aufzunehmen und damit das Unternehmen neu zu positionieren.

Auch der *Unternehmenswert* spielt eine wichtige Rolle, insbesondere bei börsennotierten Unternehmen. Der Vorstandsvorsitzende unseres Partnerunternehmens Norddeutsche Affinerie (NA) scheint z. B. durchaus auch den Aktienkurs seines Unternehmens im Blick gehabt zu haben, als bei einem Vortrag im Rahmen der Ringvorlesung ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ im Rahmen unseres Projekts sowohl die hohen Umweltstandards, also auch die weitergehenden Nachhaltigkeitsanliegen bis hin zu den sozialen Problemen in den Erzförderländern als ‚Herausforderungen für das Unternehmen‘ bezeichnete. Stolz konnte er anhand von Kennzahlen belegen, dass die NA zu den besten Kupferhütten der Welt gehört, nicht nur beim Markterfolg, sondern auch z. B. bei den Arbeitsbedingungen, bei der Anlagenverfügbarkeit oder beim SO₂-Ausstoß pro produzierte Tonne Reinstkupfer. Allein die Tatsache, dass angesichts heutiger Standards eine Kupferhütte nur drei Kilometer vom Hamburger Rathaus entfernt betrieben werden kann, wurde von ihm zurecht als bemerkenswert heraus gestellt. Wie sehr das Nachhaltigkeitsthema ‚Zukunft‘ den aktuellen Wert eines Unternehmens bestimmt, wie viel „Psychologie“ im Wirtschaften steckt, wie sehr Erwartungen z. T. sogar über die Fakten von schwarzen Zahlen dominieren können, führt uns ja die Börsenentwicklung immer wieder drastisch vor Augen.

Das Beispiel NA ist in diesem Zusammenhang besonders interessant, weil es eine Hypothese teilweise widerlegt, die wir auf anderen Feldern, z. B. bei den nachhaltigkeitsorientierten Produktstrategien gewonnen haben. Dort scheinen die Nachhaltigkeitsanliegen dann besonders erfolgreich aufgegriffen zu werden, wenn es sich um Produkte bzw. Märkte handelt, auf denen ein besonders enger Kontakt zum Endkunden besteht, in denen besonders intensiver Wettbewerb (insbesondere Qualitätswettbewerb) herrscht, also um Märkte, die besonders wettbewerbsintensiv, nachfragedominiert, stark fragmentiert und besonders dynamisch sind. Vieles davon gilt sicher auch für den Kupfermarkt, aber Kupfer ist und bleibt ein Endkonsumenten fernes (fordistisches) Massenprodukt. Um so interessanter ist also in diesem Fall der Impuls für nachhaltigeres Wirtschaften, der ohne Zweifel wettbewerbsgetrieben ist, der aber wohl vor allem aus den Richtungen Börse und Öffentlichkeit gespeist wird und damit insbesondere den Unternehmenswert tangiert.

Selbstverständlich hat auch die Innovationsstrategie mit Problemen zu kämpfen. Einige sind schon sichtbar, andere mögen bei diesem vergleichsweise ‚jungen‘ Ansatz bisher nur noch nicht deutlich geworden sein. Ein zentrales Problem der Verbesserung der Innovationsfähigkeit kann in ihrer tendenziellen ‚Richtungslosigkeit‘ liegen. Wenn man ‚nur‘ die Innovationsfähigkeit verbessert, gibt es keinerlei Garantie dafür, dass diese Fähigkeit auch nur (oder vor allem) für Innovationen in Richtung Nachhaltigkeit genutzt wird. Es spricht aber einiges dafür, dass durch das Projekt zumindest Leitbild-Skizzen in die regionalen Innovationssysteme eingespeist wurden, die die Verknüpfung zwischen Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit bzw. die Orientierung auf ein Nachhaltigeres

⁷² Porter 1991

Wirtschaften geprägt haben. Diese Leitbilder wurden und werden von den beteiligten Akteuren mit ihren Einflussmöglichkeiten weiter entwickelt und ggf. auch ‚ausgemalt‘ oder ‚umgezeichnet‘. Entscheidend scheint also auch für die Innovationsrichtung die konkrete Konstellation im Innovationssystem zu sein, wer die Akteure sind, wie sie sich einbringen und welche Einflussmöglichkeiten sie haben.

5.3 Die Region als Handlungsraum

Ein wesentlicher Grund für die Wahl der regionalen Handlungsebene liegt im Zugang zu wesentlichen Akteuren. Die wichtigsten Nachhaltigkeitsprobleme mögen zwar globaler Natur sein, aber Vieles spricht dafür, dass sie auf der globalen Handlungsebene (allein) nicht zu lösen sind. Eine globale politische Handlungsebene ist erst im Aufbau begriffen und zudem stark mit aktuellem Krisenmanagement beschäftigt. Es gibt aber durchaus auch erfolgreiche Ansätze für ‚globale Strategien‘ bzw. eine ‚Global Governance‘ im Bereich der skizzierten Nachhaltigkeitsdefizite. Das Zustandekommen und die Umsetzung des Montreal Protokolls zum Ausstieg aus den FCKWs kann z. B. durchaus als eine Erfolgsstory betrachtet werden. Für diesen Erfolg waren aber auch einige spezifische ‚glückliche Umstände‘ mit verantwortlich, z. B. eine überschaubare Zahl an Akteuren (insbesondere an Unternehmen, die diese Ozon zerstörenden persistenten Substanzen hergestellt haben) sowie die schnelle Verfügbarkeit eines Substitutes (R 134 a), das sogar noch von denselben Herstellern produziert werden konnte. Schon bei der Klimaproblematik, die es auf der stofflichen Seite auch noch mit einer vergleichsweise überschaubaren Anzahl von Treibhausgasen zu tun hat, werden im Vergleich zum Montrealprotokoll die Grenzen der globalen Handlungsebene überdeutlich. Die Vermeidung bzw. Verringerung globaler Klimaveränderungen wird nur durch ein Zusammenwirken der globalen, nationalen, regionalen und lokalen Handlungsebenen zu bewerkstelligen sein. Dasselbe gilt für die weitreichendsten Nachhaltigkeitsprobleme der Metallwirtschaft, für die langfristige Ressourcenverfügbarkeit, für die tiefen Eingriffe in Ökosysteme und sozio-ökonomischen Systeme im Zusammenhang mit dem Erzabbau und für die Langfristfolgen im Bereich der Emissionen und Abfälle, also insbesondere die Klimaproblematik aber auch die Akkumulation von Schwermetallen in der Umwelt und in den Nahrungsnetzen.

Die Entscheidung, die Möglichkeiten der regionalen Handlungsebene im Rahmen eines dreijährigen Modellprojektes auszuloten, war ohne Zweifel auch eine Entscheidung für einen konkreten Raum, mit Akteuren, zu denen in vielen Fällen schon Kontakte und z. T. auch Arbeitsbeziehungen bestanden. Das für uns interessante konstitutive Element der ‚Handlungsebene Region‘ waren damit allerdings weder die politischen Grenzen des Bundeslandes Hamburg, noch irgendwelche geographischen oder sozio-ökonomischen Abgrenzungen des Ballungsraumes. Der Regionalbezug des Projektes galt dem ‚Akteursraum Hamburg‘, galt der ‚räumlichen Nähe‘ als Grundlage für Akteursbeziehungen, als Grundlage für direkte Kommunikation und darauf aufbauend sich entwickelnde Vertrauensbeziehungen. Räumliche Nähe zwischen den Akteuren, direkte Kommunikation und Vertrauen - so lautete eine wesentliche Arbeitshypothese – sind wesentliche Voraussetzungen für Innovationsfähigkeit, für das gute Funktionieren ‚regionaler Innovationssysteme‘.

Dass weniger der konkrete Raum, sondern eher räumliche Nähe, dass weniger regionale Stoffströme, sondern eher regionale Akteursbeziehungen den Kern des Regionalbezuges bilden, war nicht von Anfang an so geplant gewesen. Bei Projektbeginn war noch offen, ob bzw. inwieweit sich die Regionalorientierung im Projekt stärker auf die Akteursbeziehungen oder stärker auf die Stoffströme beziehen sollte. Im ursprünglichen Projektdesign sollten die Stoffströme zwischen den verschiedenen Wirtschaftsakteuren noch stärker die stofflich-technische Basis für überbetriebliche Kooperationen abgeben, sozusagen als ‚hartes Bindeglied‘ für Transaktionen und Kooperationen in der Wirtschaftsregion. Der Großteil der praktischen Teilprojekte drehte sich deshalb um regionale Stoffströme bzw. um die Regionalisierung von Stoffströmen. Dies gilt insbesondere für zwei Teilprojekte, in denen sogar die Schließung von regionalen Stoffkreisläufen, bzw. zumindest die Etablierung von

Verwertungskaskaden das Ziel war: für die Verwertung von Strahlmittelabfällen und für die Verwertung von Schleifschlämmen. Erst im Verlauf des Projektes wurde immer deutlicher, wie sehr die räumliche Nähe für die Akteursbeziehungen von entscheidender strategischer Bedeutung ist. Die Verschiebung der Aufmerksamkeit vom regionalen Stoffstrommanagement zum regionalen ‚Akteursmanagement‘ hat auch - aber nicht nur und nicht einmal vorwiegend - etwas mit den oben schon angesprochenen begrenzten Möglichkeiten eines ‚regionalen Stoffstrommanagements‘ zu tun. Obwohl ein großer Teil der praktischen Aktivitäten nach wie vor mit Ansätzen eines ‚regionalen Stoffstrommanagements‘ beschäftigt blieb, hat sich im Verlauf des Projekts auf der analytischen Ebene diese Schwerpunktsverschiebung durchgesetzt. In den stoffstromorientierten Projekten verschob sich der Fokus der Aufmerksamkeit von den Stoffströmen auf die diese ‚bewegenden‘ Akteursbeziehungen. Die von Anfang an ohnehin vorwiegend akteursorientierten Teilprojekte, die Ringvorlesung und die Weiterentwicklung des Projekt-Beirats zu einem bei der Handelskammer angesiedelten ‚Forum Nachhaltiges Wirtschaften Hamburg‘ gewannen an Bedeutung. Wenn es die damit verbundene systematische Überforderung nicht von vornherein verbieten würde, könnte man formulieren, dass sich der Fokus des Projekts verschob vom Versuch eines ‚regionalen Stoffstrommanagements‘ zum Versuch eines ‚regionalen Innovationsmanagements‘. Im Zentrum des regionalen Ansatzes standen damit zunehmend nicht die Stoffströme, sondern die handelnden Menschen und damit die Akteurskonstellationen in den regionalen Innovationssystemen der Hamburger Metallwirtschaft.

5.3.1 Innovationsfähigkeit in regionalen Innovationssystemen

Damit sind wir bei der dritten wesentlichen Voraussetzung erfolgreicher Nachhaltigkeitsstrategien. Neben den zu lösenden Aufgaben einer Vermittlung zwischen Aktualität und Langfristigkeit sowie zwischen globalen Problemlagen und lokaler bzw. regionaler Handlungsebene gehört zu den Grundvoraussetzungen jeglicher Nachhaltigkeitsstrategien die schlichte Fähigkeit zur Veränderung. Anknüpfend an den Arbeiten von Porter, denen zufolge der Weltmarkterfolg von Unternehmen in der Regel ‚homebased‘ ist, also auf einem gut funktionierenden ‚regionalen Innovationssystem‘ basiert⁷³, standen die regionalen Akteursbeziehungen, die ‚regionalen Innovationssysteme‘ der Hamburger Metallwirtschaft im Zentrum der Betrachtung. Als ‚Innovationssystem‘ wird dabei die Gesamtkonstellation aller für Innovationen wichtigen Akteure bezeichnet einschließlich der Art und Qualität ihrer Beziehungen untereinander und ihrer Einflussmöglichkeiten. Als wesentliche Rahmenbedingungen gelten die jeweiligen Formen staatlicher Regulation und die aktuellen Anforderungen (die Formen) der jeweiligen Märkte. Die ‚räumliche Nähe‘ und die damit verbundenen Möglichkeiten einer direkten Kommunikation sollten für den Aufbau von Vertrauen, die Senkung von Transaktionskosten und nicht zuletzt eine Verbesserung der Innovationsfähigkeit und des Innovationsklimas genutzt werden. Dass angesichts derart weit reichender Ansprüche das Projekt über einige positive Ansätze kaum hinaus gekommen ist, verwundert allerdings wenig. Der Aufbau von Vertrauen, die Vernetzung von Unternehmen (top down, ausgehend von einem Systemführer und bottom up als Vernetzung von KMUs) brauchen vor allem Zeit.

Im Fokus des Projekts standen die Innovationssysteme der Metallwirtschaft der Region Hamburg, also ‚regionale Innovationssysteme‘ mit einem werkstoffbezogenen (und damit zumindest teilweise sektoralen) Kernbereich⁷⁴. Da sowohl die Wirtschaftsbeziehungen als

⁷³ Porter 1991

⁷⁴ Unter dem Begriff Metallwirtschaft sind die Wertschöpfungsketten derjenigen Unternehmen zusammengefasst, die im Wesentlichen auf der werkstofflichen Basis von Metallen wirtschaften. Einbezogen wird dabei der gesamte Produktlebenszyklus, also auch die Rohstoffförderung und –verarbeitung, die Produktherstellung und –nutzung, die Produktverwertung und das Recycling, die den Metallkreisläufen zuordenbare Abfallwirtschaft sowie - soweit als möglich - auch die nachhaltigkeitsrelevanten Nebenstoffströme (z. B. Korrosionsschutz, Beschichtungen und Kühlschmierung).

auch die Stoffströme und somit auch die Nachhaltigkeitsdefizite der Hamburger Metallwirtschaft weit über die Region hinausgreifen, musste die Betrachtung der Innovationssysteme entsprechend ausgeweitet werden hin zu einer integrierten Betrachtung von Produktlinien und Wertschöpfungsketten und somit auch zu eher ‚sektoralen Innovationssystemen‘. Um bezogen auf diese globalen Netze das Gewicht der Hamburger Metallwirtschaft deutlich zu machen, greifen wir zum Bild der Hamburger Metallwirtschaft als ‚Gravitationszentrum‘ in diesem internationalen Geflecht von Gravitationslinien.

Innovationsfähigkeit ist ohne Zweifel auch angewiesen auf die Fähigkeiten von Einzelakteuren, letztendlich handelt es sich bei der Innovationsfähigkeit aber um eine akteursübergreifende ‚systemische Qualität‘. Für die Verbesserung dieser ‚systemischen Qualität‘, für das gute Funktionieren ‚regionaler Innovationssysteme‘ scheint die ‚räumliche Nähe‘ zwischen wesentlichen Akteuren eine gute Voraussetzung zu bieten. Das war unsere Ausgangshypothese. Und obwohl wir nur ein Handvoll Praxis-Projekte realisieren konnten, und sich insofern weitreichende Verallgemeinerungen und Übertragungen verbieten, scheinen unsere praktischen Erfahrungen und Erfolge diese Ausgangshypothese auch zu stützen.

‚Räumliche Nähe‘ mag eine gute und vermutlich auch wichtige Voraussetzung für erfolgreiche Innovationssysteme sein, aber sie ist bei weitem nicht hinreichend. Entscheidend ist, ob und wie diese Voraussetzungen genutzt werden. Räumliche Nähe ist nach unseren Erfahrungen wichtig als Basis für direkte (face to face) Kommunikation. Über diese kann Vertrauen aufgebaut werden. Und Vertrauen ist wiederum eine wichtige Voraussetzung zur Senkung von Transaktionskosten, wobei diese Transaktionskosten sich mittlerweile insbesondere bei hoch innovativen Unternehmen mit differenzierter Qualitätsproduktion und immer kürzeren Produktzyklen zu einem der entscheidenden Kostenfaktoren entwickelt haben. Doch diese Potentiale müssen wie gesagt auch genutzt werden. Insbesondere Akteure des Hamburger Maschinenbaus wiesen z. B. immer wieder auf den Kontrast hin zwischen dem Wettbewerbsdruck zur (bzw. den Chancen einer) regionalen Vernetzung einerseits und der nach wie vor vorherrschenden Sprachlosigkeit und den unübersehbaren Kommunikationsdefiziten zwischen den regionalen Unternehmen andererseits. Unsere Erfahrungen deuten darauf hin, dass die regionale Vernetzung – die Integration und Organisation von Akteursbeziehungen zu funktionierenden ‚Innovationssystemen‘ - ausgehend von einem als ‚Systemführer‘ auftretenden Großunternehmen und damit ‚top down‘ sehr viel besser gelingt, als ‚bottom up‘ über den regionalen Zusammenschluss mehrerer mittelständischer und kleiner Unternehmen.

Der Blick auf die Akteure im Kontext ‚regionaler Innovationssysteme‘ macht ein weiteres Spezifikum unseres Projekts deutlich. Es geht um Nachhaltigkeitsstrategien in Kooperation mit Unternehmen. Selbstverständlich gehören zu erfolgreichen regionalen Innovationssystemen immer auch die staatlichen und zivilgesellschaftlichen Akteure. Die Einbeziehung und der rege Austausch insbesondere mit der Hamburger Umweltbehörde (z. T. auch mit der Wirtschaftsbehörde) und dem Hamburger Zukunftsrat, als wichtigem Zusammenschluss der zivilgesellschaftlichen Akteure, war von Anfang an ein wesentlicher Bestandteil des Projekts. Trotzdem haben wir uns auf die Unternehmen der Hamburger Metallwirtschaft und die sie mit vertretende Handelskammer Hamburg konzentriert. Im Zentrum unseres Interesses stand die erfolgreiche Kooperation von Unternehmen der Hamburger Metallwirtschaft untereinander und mit uns als Wissenschaftspartnern für konkrete Schritte in Richtung Nachhaltiges Wirtschaften.

5.3.2 Die Wirtschaftsregion Hamburg

Mit ca. 1,7 Mio. Einwohnern und einer Fläche von 755 km² ist die Freie und Hansestadt Hamburg nach Berlin die zweitgrößte deutsche Stadt. Der Stadtstaat⁷⁵ ist eingebunden in eine weit über die Stadtgrenzen hinausreichende Ballungsregion. Die Metropol-Region Hamburg umfasst eine Fläche von 18.116 km² und eine Wohnbevölkerung von rund 4 Mio. Menschen.

Hamburg ist bekannt als Hafenstadt, als ‚Tor zur Welt‘. Die Wirtschaft Hamburgs ist nach wie vor stark geprägt durch den Hafen und die Importprodukte verarbeitende Industrie (Nahrungs- und Genussmittel, Mineralölprodukte). Inzwischen spielt zusätzlich der Dienstleistungsbereich eine besonders wichtige Rolle. Dabei geht es nicht nur um die immer noch hafenbezogene Logistik, sondern auch um Hamburg als Medienstandort, z.B. werden 18 der 20 auflagenstärksten deutschen Zeitschriften in Hamburg verlegt.

Die Wirtschaftsregion Hamburg ist wie alle anderen Wirtschaftsregionen kein in sich abgeschlossener Wirtschaftsraum. Wir bevorzugen das Bild eines „Knotens“ in den weltweit gespannten Wirtschaftsgeflechten bzw. eines Gravitationszentrums in den sich über den Globus ziehenden sozio-ökonomischen Gravitationslinien der globalen (Metall)Wirtschaft. Bei differenzierterer Betrachtung nimmt man eine Vielzahl qualitativ unterschiedlicher weltweiter Wirtschaftskooperationen wahr, wobei wichtige Unternehmen - als „Knotenpunkte“ - ihren Sitz in der Region Hamburg haben. Auch die Häufung solcher weltmarktorientierter Unternehmen ist zum Teil ein maritimes Erbe der größten deutschen Hafenstadt.

Dort wo die in Hamburg ansässigen Unternehmen die Systemführerschaft in den jeweiligen Produktions- oder Handelsketten innehaben, also die Gestaltung und Vermarktung maßgeblich bestimmen, beeinflussen sie die Qualität und Quantität von Warenströmen (und die damit verbundenen Stoff-, Energie-, Geld- und Informationsströme) weit über die Region hinaus. Hierzu ein Beispiel: Die „Kraftlinien“ des metallwirtschaftlichen Gravitationszentrums Hamburg reichen für die „Norddeutsche Affinerie“ (Europas größte Kupferhütte) bis zu den Kupferminen Südostasiens und Südamerikas. Vergleichbar gewichtige „Knoten“ finden sich auch in anderen Branchensegmenten. Beispiele sind hier u. a. der Axel Springer Verlag als größter deutscher Zeitungsverlag, der aufgrund der Mengenbedeutung seiner Papierbeschaffung direkten Einfluss auf Waldnutzungsstandards in Nord- und Osteuropa oder auch Kanada ausübt, oder der Otto Versand, der über hauseigene Standards die weltweiten Herstellungsbedingungen von Baumwolle und Textilien mitgestaltet.

5.3.3 Die Hamburger Metallwirtschaft

Trotz des angedeuteten wirtschaftlichen Strukturwandels in Richtung Dienstleistungsbereich ist die Metallwirtschaft im Hamburger Raum auch heute noch durchaus prominent besetzt. Im Zusammenhang mit der in den 70er Jahren vorherrschenden Industrialisierungspolitik wurden seinerzeit insbesondere Grundstoffindustrien angesiedelt, wobei die dafür benötigte elektrische Energie durch den Bau gleich mehrerer Kernkraftwerke bereitgestellt wurde. Auf diese Weise entstand eine erstaunliche Konzentration von Metalle produzierenden Unternehmen. Zu nennen sind hier, zusätzlich zur schon lange vorher in Hamburg ansässigen Kupferhütte Norddeutsche Affinerie, die Hamburger Aluminium Werke, die Aluminium Oxid Werke in Stade sowie das Elektrostahlwerk ISPAT Hamburger Stahlwerke. Auf den nächsten Stationen der Wertschöpfungskette, im Bereich der Metallverarbeitung dominiert neben dem eher regional orientierten Metallverarbeitenden Handwerk und dem Metallbau der exportorientierte Maschinenbau. Alle drei Branchen sind eher klein- und mittelbetrieblich strukturiert. Hinzu kommen Betriebe des Fahrzeug- und Flugzeugbaus (EADS, Lufthansa Technik, Daimler-Chrysler) sowie der Herstellung von Flurförderfahrzeugen (Jungheinrich, Still). Weite Teile der Metallwirtschaft der Region Hamburg sind also überwiegend weltmarktorientiert und auf dem Weltmarkt auch

⁷⁵ Genauso wie Berlin und Bremen ist Hamburg nicht nur eine Stadt, sondern auch ein Bundesland im föderalen System der Bundesrepublik Deutschland.

weitgehend erfolgreich⁷⁶. Die mit der Metallerzeugung und dem Metall verarbeitenden Maschinenbau verbundenen Stoffströme sind somit genauso global wie die Wirtschaftsbeziehungen dieser Branchen. Dies gilt sowohl für ihren Input (Rohstoffe und Zulieferindustrie) als auch für ihren Output (Halbzeug und Produkte). Von der ökonomischen Bedeutung her, aber auch mit Blick auf die Metall bezogenen Stoffströme ist die Klassifikation als ‚Gravitationszentrum‘ durchaus berechtigt. Die Hamburger Metallwirtschaft ist einerseits stark abhängig vom Weltmarkt, aber sie beeinflusst ihn auch bis zu einem gewissen Grad.

Die Hamburger Metall verarbeitende Industrie, bzw. das Metall verarbeitende Gewerbe entwickelte sich ursprünglich in starker Abhängigkeit von den regionalen Absatzmärkten. Dies waren die Werften, die Hafendienstleister mit einem hohen Bedarf an Fördermitteln, die Nahrungsmittelbranche, welche die aus Übersee importierten Rohstoffe verarbeitete, und die Bauwirtschaft der expandierenden Stadt. Der starke Umbruch in diesen Schlüsselbranchen durch die wirtschaftlichen Turbulenzen in den 70er und 80er Jahren (u. a. Werftenkrise) war die Ursache für einen hohen Beschäftigungsverlust in dieser Zeit. Der Maschinenbau spielt aber nach wie vor eine bedeutende Rolle. In ihm sind mittlere Betriebsgrößen (50 –500 Beschäftigte) stark unterrepräsentiert im Vergleich zum Bundesgebiet, kleine und Großbetriebe sind hingegen stärker vertreten [Läpple 1993: S. 37-40]. Mit der geforderten Neuorientierung auf andere Märkte tat sich gerade der Hamburger Maschinenbau in weiten Bereichen schwer. In einer einschlägigen Branchenuntersuchung werden dafür u. a. die folgenden Faktoren benannt (Bukhold 1991 S 189-21):

Beim Maschinenbau im Norden dominierte die Fertigung einfacher grobmechanischer Produkte für die Werften, während die feinmechanischen und elektronischen Komponenten für den Fahrzeugbau, aber auch für den Schiffbau eher aus Süddeutschland kamen. Die norddeutsche Zulieferindustrie hatte somit besonders große Anpassungsleistungen zu erbringen. Ein ähnliches Bild bestand auch im Bereich der Lebensmittelindustrie. Auch hier hatten viele Zulieferer über viele Jahre hinweg mit vergleichsweise einfachen Produkten (Verarbeitungsaggregate, wie Mühlen, Rührwerken etc.) durch die Nähe zu den großen weltweit operierenden Handelshäusern geschützte Märkte vorgefunden, die im Zuge der starken Konzentrationsbewegungen in der Lebensmittelindustrie wegbrachen.

Der Maschinenbau ist in sich sehr heterogen. Das führt dazu, dass die Unternehmen nur wenig gemeinsame Grundlagen für Kooperationen und die Zusammenführung ihrer Ressourcen finden. Die Chancen für ein regionales „pooling of resources“⁷⁷ zur regional verankerten Entwicklung neuen Wissens, neuer Produkte und Verfahren sind vergleichsweise gering⁷⁸. Dies führt dazu, dass die Zulieferer von Metall- und Maschinenbaukomponenten der großen in Hamburg ansässigen Unternehmen im Bereich der Fördertechnik, der Medizintechnik oder des Flugzeugbaus überwiegend nicht in der Region ansässig sind, sondern hier Kooperationen mit Partnern und Zulieferern außerhalb der Wirtschaftsregion dominieren.⁷⁹

Die heterogene Struktur und das geringe Angebot an ausreichend qualifizierten Zulieferern verstärken sich dabei gegenseitig und stabilisieren die insgesamt vergleichsweise geringe innerregionale Verflechtung. Die Analyse der regionalen Wirtschaftsstruktur durch Walter und Läpple lässt sich somit folgendermaßen zusammenfassen: Zum einen haben das relativ breite Produktionsspektrum der Hamburger Industrie mit einem entsprechend geringen Spezialisierungsgrad und der niedrige Besatz in einzelnen Branchen zur Folge, dass der Bedarf an bestimmten Vorprodukten zu gering ist, um Investitionen in neue

⁷⁶ Was nicht heißen soll, dass keine ökonomischen Probleme und Risiken vorhanden wären. Sowohl der Hamburgische Maschinenbau als auch die Hamburgische Stahl- und Aluminiumindustrie teilten durchaus die Krisensymptome mit denen ihre jeweiligen Branchen in den vergangenen Jahren zu kämpfen hatten.

⁷⁷ Kilper, Latniak 1996: 221

⁷⁸ Dies zeigt u.a. eine aktuelle Untersuchung von Walter, G.: 2002

⁷⁹ Aktuelle Bestrebungen z.B. von Airbus Deutschland, die regionalen Zulieferanteile zu steigern, führen in Einzelfällen zwar durchaus zu interessanten Erfolgen, schlagen sich bislang bei einer Breitenbetrachtung aber noch kaum nieder.

Produktionskapazitäten vor Ort zu rechtfertigen. Zum anderen tut sich ein Teil der Hamburger Unternehmen offenbar auch schwer mit der Auslagerung einzelner Funktionen bzw. Wertschöpfungsstufen⁸⁰.

Solche „Regionalwirtschafts-Analysen“ schärfen zwar das Problemverständnis, und sie geben auch Hinweise in welcher Richtung Lösungen gesucht werden müssen. Sie sind aber nicht ohne weiteres in „Strategien“ umzumünzen. Die subjektive Wahrnehmung von Handlungsoptionen und „vermeintlichen“ Hemmnissen durch die Wirtschaftsakteure hat zumindest in der Anfangsphase für Veränderungsprozesse eine hohe Bedeutung. Bei den Betriebskontakten im Projektrahmen vielfach vorgefundene Einschätzungen von Unternehmensangehörigen waren z.B.: „Es ist schwierig für uns, ausreichend qualifizierte Kooperationspartner in der Region zu finden“⁸¹ und „Die Umstellung auf eine neue (flexiblere und umweltschonendere) Prozesstechnik wird von unseren Kunden nicht honoriert“⁸². Unabhängig von den Möglichkeiten zu ihrer „objektiven Überprüfung“ stellen solche Einschätzungen mehr oder weniger gerechtfertigte, aber eben zunächst einmal „gegebene“ Vorbehalte gegen „einfache“ Lösungen dar. Andererseits dürften gerade in der Überwindung derartiger Kooperations- und Innovationsdefizite relevante Potentiale für eine Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur liegen⁸³.

Um diese Potentiale erschließen zu können, ist allerdings eine detaillierte Kenntnis der Stärken und Schwächen der einzelnen Betriebe unumgänglich. Externe Akteure (Moderatoren und Berater) die hier unterstützend tätig sein wollen, benötigen somit einen geeigneten Betriebs-Zugang. Großartige Versprechen im Sinne von: „Wir machen gemeinsam ein Nachhaltigkeits-Projekt und lösen damit eure Kooperations- und Innovationsdefizite“ sind dafür gänzlich ungeeignet, denn weder kann ein derartig pauschales Vorabversprechen seriös eingelöst werden, noch werden solche „ungefragten Besserwisser“ von den Unternehmen akzeptiert. Es werden also gleich zu Beginn mittelfristige Leitbilder für eine betriebliche Nachhaltigkeits-Strategie benötigt, die in konkreten Projekten in einem begrenzten Zeitrahmen mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit zu erkennbaren Erfolgen führen, und die dann Schritt für Schritt über etwas ambitioniertere Fragestellungen zu den skizzierten grundlegenden Nachhaltigkeitsfragen im regionalen Unternehmenskontext führen können.

5.3.4 Vernetzungserfolge

Wenn Nachhaltigkeitsstrategien in Kooperation mit Unternehmen realisiert werden sollen, muss nach Herstellung des ersten Kontakts zweierlei geleistet werden, es gilt, thematische Anknüpfungspunkte für Kooperationen zu finden und es gilt darauf aufbauend, Projekte zu formulieren, die in einem überschaubaren Zeitraum erfolgreich durchgeführt werden können. Die ersten thematischen Anknüpfungspunkte ergeben sich in der Regel nicht direkt aus den großen und eher langfristigen Nachhaltigkeitsdefiziten. Wir konnten zwar in einigen Teilprojekten die Erfahrung machen, dass im Rahmen einer schon existierenden Kooperation eine ‚Aktualisierung‘ der meist schleichend daher kommenden großen und langfristigen Nachhaltigkeitsprobleme mit Hilfe z. B. von Stoffstrommodellen möglich ist, und dass damit auch ‚Betroffenheit‘ geschaffen werden kann. Die konkreten Einstiege in praktische Kooperationen setzten aber meist an viel aktuelleren Problemen an, am Arbeits- und Umweltschutz, an Entsorgungsproblemen, an problematischen Kostenentwicklungen

⁸⁰ Nach Walter, G. a.a.O

⁸¹ Dieses Problem wurde u.a. bei der Diskussion über die Chancen und Grenzen der verstärkten Umsetzung einer Modulstrategie bei einem beteiligten Fördertechnikhersteller benannt.

⁸² Diese Argumente wurden u.a. bei der Prüfung der Möglichkeiten für die verstärkte Nutzung der sowohl Umweltprobleme als auch Produktverunreinigungen reduzierenden Trockenbearbeitung bzw. Minimalmengenschmierung in der spanenden Metallbearbeitung angeführt.

⁸³ Im Zusammenhang damit könnten durch verminderte Ferntransporte, durch den Einsatz effizienterer Produktionsprozesse bei spezialisierten Teilfertigern und über die Sicherung bzw. Schaffung hoch qualifizierter Arbeitsplätze Verbesserungen in allen drei Nachhaltigkeitsdimensionen erreicht werden.

und Handhabungsproblemen mit Blick auf bestimmte Stoffströme (z. B. Kühlschmierstoffe oder Beschichtungen) und am Ziel einer Verbesserung des Unternehmensmanagements durch mehr Klarheit auch über betriebliche und überbetriebliche Stoffströme. Von entscheidender Bedeutung ist dabei allerdings, dass uns die Unternehmen auch die Fähigkeiten zutrauten, angesichts dieser konkreten Problemlagen wirklich etwas Hilfreiches beitragen zu können. In dieser Hinsicht erwies sich der institutionelle Hintergrund der wissenschaftlichen Projektpartner als ausgesprochen hilfreich. Dort wo nicht ohnehin schon Arbeitsbeziehungen bestanden, scheinen die institutionellen Vorerfahren und damit die ‚Herkunft‘ der Akteure aus der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, vom Ingenieurbüro für Sozial- und Umweltbilanzen SUMBi und vom Institut für Ökologie und Politik Ökopol Hamburg zu einem hinreichenden Vertrauensvorschluss geführt zu haben. Die Kooperationsbeziehungen unterschieden sich dadurch äußerlich kaum von zahlreichen anderen Projekten, zu denen vom Unternehmen externer wissenschaftlich-technischer bzw. Management-Sachverstand hinzugezogen wurde⁸⁴.

Ein nächster wesentlicher Schritt ist die Konzeption von Nachhaltigkeitsprojekten, die in einem überschaubaren Zeitraum erfolgreich durchgeführt werden können. Probleme gibt es schließlich mehr als genug in jedem Unternehmen, und die aktuellen, kurzfristigen sind meist auch die drängenderen. Hinzukommen muss also die Bereitschaft und auch die Fähigkeit von Unternehmen, hier und jetzt etwas zu tun zur Lösung von Problemen, die derzeit möglicherweise nicht sehr akut, oft ziemlich komplex und meist eher langfristiger Natur sind. Nach unseren Erfahrungen hängen die erforderlichen Problemlösungsfähigkeiten dabei meist enger mit dem aktuellen Zustand der Unternehmen zusammen, als es die Akteure selbst wahrhaben wollen. Ein gut geführtes Unternehmen, das in der Lage ist, seine drängenden aktuellen ökonomischen Probleme zu lösen, ist meist auch in der Lage, die komplexeren und längerfristigen Fragen anzugehen. Letzteres gilt für die strategische Orientierung des Unternehmens, für die längerfristige Wettbewerbsfähigkeit, für die Marktstrategie und Produktentwicklung, für die Finanzstrategie, die Personalentwicklung genauso wie für die längst auf die gesamte Wertschöpfungskette ausgedehnte Produktverantwortung, für die Sicherung der Ressourcenbasis und die Verminderung der problematischen langfristigen Umwelt- und Gesundheitseffekte der Metallwirtschaft. Damit ist auch schon die ganze Breite relevanter Themen und Kooperationsansätze aufgespannt. Damit ist aber auch schon angedeutet, dass wir von einer vergleichsweise komplexen ‚Interessenslage‘ von Unternehmen ausgehen, bei der die meist in den Vordergrund geschobenen ‚Interessen‘ von Unternehmen, wie z. B. die nach ‚Kosteneinsparungen‘ eine eher sekundäre teilweise sogar untergeordnete Rolle spielen.

Besonders wichtig im regionalen Kontext ist der Aspekt, dass praktisch alle wirklich grundlegenden Veränderungen von Prozessen und Produkten in den Unternehmen neue Formen der Zusammenarbeit mit externen Partnern erfordern. Vor allem für die flexible Anpassung komplexer Produkte an variable Kundenwünsche benötigen insbesondere KMU stabile, auf Dauer angelegte *Entwicklungsnetze*, in denen jeder der Partner gleichrangig, (symmetrisch) spezialisierte Beiträge beisteuert, und bei denen sich die Kooperationspartner

⁸⁴ In der aktuellen Projektpraxis verbieten sich ja eher Metareflectionen darüber, wie man den Projektpartner (bzw. seine Rolle) in den Kooperationsbeziehungen sieht. Deshalb können wir hier auch nur spekulieren, wie unsere Kooperationspartner uns eigentlich gesehen haben, bzw. welche Motive die Partner in den Kooperationen verfolgten. Wenn man vom unmittelbar Persönlichen (z. B. Sympathie und Antipathie) abstrahiert, also die ‚funktionalen‘ Aspekte betont, scheinen bei unseren Partnern folgende Aspekte in je unterschiedlicher Mischung und Gewichtung von Bedeutung gewesen zu sein. 1. die schon angesprochene wissenschaftlich-technische bzw. Managementkompetenz (Berater) zur Lösung konkret anstehender Probleme bzw. zur Realisierung bisher ungenutzter Chancen im Unternehmen, 2. der über das Projekt vermittelte Zugang zu einem regionalen öffentlichen Diskurs über Nachhaltigkeit (in der Metallwirtschaft) und damit verbunden ein durchaus erwünschtes entsprechendes öffentliches ‚Flagge zeigen‘ des Unternehmens, und 3. glauben wir hin und wieder auch schlicht den intellektuellen Reiz gespürt zu haben, sich neben der Routine der Alltagspraxis auch mit übergreifenden Themen wie Nachhaltigkeit oder mit anspruchsvollen wissenschaftlichen Themen wie Entropiebilanzen zu beschäftigen.

somit auch durchaus in eine enge gegenseitige Abhängigkeit begeben. Sowohl in dieser Verbindlichkeit aber auch im Grad der notwendigen Interaktion unterscheiden diese Entwicklungsnetze sich deutlich von den gerade im Handwerk zunehmend vorfindbaren *komplementären Netzen* (Zusammenschluss von Gleichen, um im Bedarfsfall auch größere Aufträge abwickeln zu können) oder den gerade im Maschinenbau weit verbreiteten *vertikalen Netzen*, wo der Systemführer seinen Zulieferern vollständig ausgearbeitete Fertigungsvorgaben übergibt und damit nur sehr geringe weitere Abstimmungsbedarfe bestehen.

Besondere Aufmerksamkeit kommt auch hier den „face-to-face“-Kontakten zu. Zum Teil konnte glücklicherweise das Anliegen in ein schon weitgehend geknüpftes Netz integriert werden. Dies war zum Beispiel bei der Unterstützung der regionalen Diffusion der Minimalmengenschmierung der Fall. Die wesentlichen Akteure dieses ‚Innovationssystems‘, bestehend aus einer Reihe von kleinen und mittleren Maschinenbauunternehmen, der in Hamburg ansässigen Geschäftsführung des VDMA Nord und der Professur für Fertigungstechnik (einschließlich eines gut ausgestatteten Labors) kannten sich schon und hatten sich auch vorher schon mit der Problematik der Kühlschmierstoffe auseinander gesetzt.

Zum Teil konnte glücklicherweise die Projektanliegen in schon weitgehend geknüpfte Netze integriert werden. Dies war zum Beispiel bei der Unterstützung der regionalen Diffusion der Minimalmengenschmierung der Fall. Die wesentlichen Akteure dieses ‚Innovationssystems‘, bestehend aus einer Reihe von kleinen und mittleren Maschinenbauunternehmen, der in Hamburg ansässigen Geschäftsführung des VDMA Nord und der Professur für Fertigungstechnik (einschließlich eines gut ausgestatteten Labors) kannten sich schon und hatten sich auch vorher schon mit der Problematik der Kühlschmierstoffe auseinander gesetzt.

Auch dem zweiten Vernetzungserfolg, der Gründung des Forums ‚Nachhaltiges Wirtschaften Hamburg‘ kam der Umstand entgegen, dass die zivilgesellschaftlichen Akteure der Region sich schon recht erfolgreich im ‚Zukunftsrat‘ zusammengeschlossen hatten. Diesem Zukunftsrat war es aber bisher nicht gelungen, Vertreter aus größeren produzierenden Hamburger Unternehmen dauerhaft zu integrieren. So sprach einiges dafür, dass als Übergangsschritt ein Zusammenschluss von Vertretern der Wirtschaft unter sich mehr Erfolg verspricht, wenn es darum geht, der Hamburger Wirtschaft im regionalen Nachhaltigkeitsdiskurs eine eigene Stimme zu verleihen⁸⁵. Auch der Hamburger Senat hatte mit dem Kursbuch ‚Zukunftsfähiges Hamburg‘ gezeigt, dass er in der Lage ist, sich der Aufgabe der Entwicklung einer landesweiten Nachhaltigkeitsstrategie zu stellen⁸⁶. Es fehlte sozusagen nur noch ein Zusammenschluss der ‚dritten Kraft‘. Der von Anfang an aus hochrangigen Vertretern der Hamburger Wirtschaft und Wissenschaft zusammengesetzte Beirat unseres Forschungsprojektes bot sich dafür als Ausgangsbasis geradezu an. Das Forum hat sich inzwischen etabliert. Es wird auch ohne die Unterstützung des Forschungsprojektes von der Handelskammer und den beteiligten Unternehmen weiter geführt. Anfang November 2003 wurde wieder eine größere öffentliche Veranstaltung mit Best-Practice-Beispielen aus Unternehmen der Region durchgeführt.

Die vorstehenden Beispiele repräsentieren sicherlich, an die Realität von produzierenden KMU anschlussfähige Konkretisierungen grundlegender Nachhaltigkeitsmerkmale, wie die Steigerung von Energie- und Ressourceneffizienz, die Fähigkeit zur strukturellen Modernisierung sowie zum Aufbau tragfähiger Kooperationsbeziehungen im Kontakt- und Vertrauensraum der Region.

Dennoch besteht die Gefahr, dass diese einzelbetrieblichen Erfolge Singularitäten in einem

⁸⁵ Es ist hier nicht der Platz, um all die Gründe dafür ausführlich zu diskutieren. Vieles hatte noch mit Schuldzuweisungen zu tun. Aber auch unterschiedliche Kulturen, Effizienzvorstellungen und Zwänge des Zeitmanagements spielen hier eine wichtige Rolle. Mittlerweile wurde der umgekehrte Weg der Integration beschritten, der Zukunftsrat wurde in das Forum aufgenommen.

⁸⁶ Vgl. Umweltbehörde Hamburg 1999

weiten Feld des „weiter so“ bleiben, bzw. dass in jedem neuen Einzelfall wieder der weite Weg von den kleinteiligen Prozessoptimierungen bis zu den eher Struktur verändernden Neuorientierungen gegangen werden muss. Genau an dieser Stelle kann der regionale Diskurs über die Formulierung und Verbreitung einigender Leitbilder den entscheidenden Impuls dazu geben, aus den „belächelten Exoten“ die „bestaunten Vorreiter“ zu machen.

Bei allen Projekten bleibt allerdings eine immense Lücke zwischen dem, was konkret gemacht werden konnte, und den hochgesteckten Ansprüchen an ‚bedeutende‘ Schritte in Richtung Nachhaltigkeit oder gar eine Moderation von komplexen Innovationssystemen. In den meisten Fällen reichte die Kooperation über die Zusammenarbeit zwischen einigen wenigen Unternehmen einerseits und den Forschungseinrichtungen andererseits nicht hinaus. Umso wichtiger wurden deshalb das Forum und die Ringvorlesung ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ und das ‚Forum Nachhaltiges Wirtschaften Hamburg‘⁸⁷. Für beide ‚Plattformen‘ ist typisch, dass sie sich stark auf eine breitere regionale (Fach)Öffentlichkeit hin orientier(t)en, dass sie nicht einzelbetrieblich orientiert (und dominiert) waren, und dass sie erst in einer gewissen ‚Distanz‘ zum Alltagsgeschäft der Unternehmen zum Tragen kamen.

Zu den ‚Sternstunden‘ des Projekts gehörte auf diese Weise im Rahmen der Ringvorlesung einerseits die Debatte über die Reichweite metallischer Ressourcen, anlässlich des Vortrags des Präsidenten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover⁸⁸ und andererseits die Debatte zwischen dem Vorstandsvorsitzenden der Norddeutschen Affinerie und Vertretern der Nichtregierungsorganisation ‚Rettet die Elbe‘ über die gravierenden ökologischen und sozialen Probleme im Umkreis der Kupfermine Ok Tedi in Papua Neu Guinea. Als erste unmittelbare Konsequenz dieser Debatte fuhr auf Einladung der NA eine gemeinsame Delegation nach Papua Neu Guinea, um vor Ort mehr Klarheit über die dortige soziale und ökologische Situation zu erlangen und mit Vertretern der Regionalregierung und der Mine Abhilfe- bzw. zumindest Linderungsmaßnahmen zu besprechen⁸⁹.

Auch wenn also die hochfliegenden Ansprüche eines ‚Managements‘ bzw. einer ‚Moderation‘ ‚Regionaler Innovationssysteme‘ nicht erfüllt werden konnten, so konnte doch Einiges erreicht werden. Das Erfolgsrezept des Projekts ‚Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg‘ scheint dabei gerade in der Kombination zweier strategischer Ansätze gelegen zu haben, einerseits einer weit gefassten Konzeption von Stoffstrommanagement, die im Wesentlichen auf langfristige ‚Ressourcensicherung‘ fokussierte (und sich dabei auch von der Region zunehmend ‚emanzipierte‘) und andererseits einer Innovationsstrategie, die sich auf die Nutzung und Verbesserung der Vorteile der regionalen ‚home base‘ der regionalen Akteursbeziehungen (Innovationssysteme) der Hamburger Metallwirtschaft konzentrierte.

5.4 Erfolgsbedingungen für Kooperationen mit Unternehmen in Nachhaltigkeitsprojekten

Im Folgenden wird anhand von Beispielen aus den am Forschungsvorhaben beteiligten Betrieben dargestellt, welche verallgemeinerbaren Erfahrungen beim Versuch gemacht wurden, diese Nachhaltigkeitsstrategien in der praktischen Kooperation mit Unternehmen umzusetzen. Wir haben versucht, in verschiedenen Teilprojekten uns schrittweise an zentrale Fragen betrieblicher und zwischenbetrieblicher Nachhaltigkeitsthemen anzunähern und möchten dabei auch zeigen, wo in diesem Prozess die besonderen Bedingungen der Wirtschaftsregion als Akteursraum zum Tragen kamen.

⁸⁷ Die Vorträge der Ringvorlesung bildeten die Grundlage für den vorliegenden Band

⁸⁸ Vgl. Wellmer, Wagner 2004

⁸⁹ Vgl. Baumgardt 2004

5.4.1 Zentrale Probleme in der Herangehensweise

Aus der Art und Qualität der Nachhaltigkeitsdefizite der Metallwirtschaft in Hamburg und darüber hinaus ergeben sich drei zentrale Schwierigkeiten bei der Anbahnung und Durchführung von (regionalen) Nachhaltigkeitsstrategien in Kooperation mit Unternehmen.

Erstens manifestieren sich die **gravierendsten und dringendsten aktuellen Nachhaltigkeitsprobleme** nicht innerhalb der Region, sondern eher in den Entwicklungs- und Schwellenländern. Dies bedeutet allerdings nicht, dass die ökonomischen Akteure der Hamburger Metallwirtschaft (insbesondere der Metallherstellung) damit überhaupt nichts zu tun haben oder darauf keinerlei Einfluss hätten. Sie sind vielmehr über ihre globalen Stoffströme und Wertschöpfungsketten direkt mit diesen Problemen verbunden. Und sie haben, dort wo sie ‚Gewicht‘ haben, als ‚Gravitationszentren‘ der internationalen Metallwirtschaft bzw. zumindest einiger globaler Stoffströme, auch einen gewissen Einfluss darauf. Ihre Produktverantwortung, die sich auf die gesamte Produktlinie erstreckt, erfordert es, sich dieser Problematik zu stellen und ihre Einflussmöglichkeiten so weit als möglich zur Linderung dieser Probleme zu nutzen.

Zweitens werden die **weit reichendsten, d. h. die im Effekt irreversiblen und meist auch globalen Nachhaltigkeitsprobleme** der Metallwirtschaft derzeit kaum wahrgenommen. Obwohl es sich dabei um hochproblematische unumkehrbare und globale Entwicklungen handelt, werden derzeit – mit Ausnahme des Treibhauseffekts - Beiträge zu ihrer Lösung von den meisten Akteuren nicht als dringend empfunden. Dies gilt insbesondere für die Sicherung einer langfristigen Ressourcenverfügbarkeit und zwar sowohl was die Primärressourcen in den Erzlagerstätten als auch was die Sekundärressourcen, insbesondere die Qualität der verbauten Metallvorräte und Schrotte anbelangt. Reichweiten von Erzlagerstätten werden zwar hin und wieder diskutiert, aber aktueller Handlungsbedarf wird - über ggf. verstärkte Prospektionsanstrengungen hinaus - nicht gesehen. Auch die Verunreinigung von Schrotten und Sekundärmetallen durch Störstoffe wird immer wieder diskutiert, aber auch dies führt derzeit nicht zur Erarbeitung vorsorgeorientierter Handlungsstrategien. Auf der Outputseite wird immerhin der Treibhauseffekt als Problematik der energieintensiven Metallbranche wahrgenommen. Die Metall erzeugende Industrie hat in Deutschland darauf auch mit einer Selbstverpflichtung zur Reduzierung ihres Energieverbrauchs reagiert⁹⁰.

Drittens stehen nach Quantität und Qualität die Dimension und Tragweite sowohl der aktuell wahrgenommenen als auch der kaum wahrgenommenen langfristigen Nachhaltigkeitsdefizite der Metallwirtschaft in einem nur schwer ertragbaren **Kontrast zu den verfügbaren regionalen Handlungs- und Einflussmöglichkeiten**. Der regionale Kommunikations- und Handlungsraum bietet sich einerseits als viel versprechender Ansatz an, und gleichzeitig erscheint er aber auch als viel zu klein. Die erzielbaren Erfolge erscheinen als völlig unzureichend. Selbstverständlich stellen die in einem Teilprojekt erreichten Reduzierungen des Kühlschmierstoffeinsatzes an inzwischen fünf Bearbeitungszentren um ca. den Faktor 1000 wichtige praktische Erfolge dar, genauso wie das Aufzeigen von Möglichkeiten einer hochwertigen Verwertung von Strahlmittelabfällen eines Partnerunternehmens in einem anderen Unternehmen der Region. Auch die erreichte Schärfung des Problembewusstseins bei wichtigen Akteuren des regionalen und nationalen Stahlkreislaufs hinsichtlich der langfristigen Akkumulation von Störstoffen oder der Aufbau einer regionalen Akteurskette für eine effektive und möglichst hochwertige Verwertung von Elektronikschrott sind wichtige und notwendige Schritte auf dem Weg zu einer nachhaltigen Metallwirtschaft und gehören zu den praktischen Erfolgen des Projekts. Diese Erfolge mit Blick auf die Größe der Aufgabe auch als **wesentliche Schritte** in Richtung auf eine ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ zu bezeichnen, fällt allerdings schwer.

⁹⁰ Die Deutsche Stahlindustrie hat sich z. B. verpflichtet bis zum Jahre 2012 ihren Energieverbrauch im Verhältnis zum Jahre 1990 um 22% zu verringern. In den Jahren 1990-2000 hat sie immerhin schon eine Verringerung um 14,5 % erreichen können

5.4.2 Konkrete Ansatzpunkte und Motivlagen

Kooperationen zwischen Wissenschaft und Unternehmen und von Unternehmen untereinander mit der Orientierung auf Nachhaltiges Wirtschaften kommen nicht zustande durch Überredung, Beschwörungen oder gar Anklagen. Sie sind auf gemeinsame Interessen bzw. Anliegen angewiesen. Mit der eher metaphorischen Unterscheidung zwischen Interessen und Anliegen soll hier angedeutet werden, dass die Motive von Unternehmen für derartige Kooperationen nicht von vornherein zu eng angesetzt werden dürfen. Unternehmen müssen Gewinne machen, das ist klar. Gewinne sind zunächst vor allem die Existenzvoraussetzung von Unternehmen, ihre innere Logik, der sie längerfristig nicht folgenlos entgegen handeln können. Entscheidend unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ist allerdings, *wie* sie Gewinne machen, ob sie Gewinne langfristig auf Kosten der anderen beiden Dimensionen der Nachhaltigkeit erwirtschaften oder sie im Einklang mit ihnen erzielen. Wie Gewinne gemacht werden können und zwar nicht nur kurz- sondern auch längerfristig, das ist im Zeitalter der Globalisierung und damit des verschärften Wettbewerbs alles andere als klar und auf der Hand liegend. Für die Erreichung des vergleichsweise eindeutigen Ziels der Sicherung oder Erhöhung des Gewinns gibt es fast beliebig viele Ansatzpunkte. Es gibt z. B. die Möglichkeit, Gewinne eher durch Senkung der Kosten oder durch Steigerung der Erlöse (z. B. durch Erschließung neuer Märkte) zu steigern. Neben der kurzfristigen Gewinnerwartung kommt es auch darauf an, den Unternehmenswert und die Unternehmensposition im Wettbewerb längerfristig zu sichern. Dabei kann es u. a. um den Wert und das Vertrauen in eine ‚Marke‘ gehen oder um Börsennotierungen. Darüber hinaus lassen sich Wirtschaftsakteure im ‚realen Wirtschaftsleben‘ durch viel mehr und weitergehende Beweggründe leiten, als ihnen mit dem Denkmodell des ‚homo oeconomicus‘ in der Regel unterstellt wird.

Obwohl man also eine über ‚Sonntagsreden‘ hinausgehende Orientierung von Unternehmen am Ziel eines ‚nachhaltigen Wirtschaftens‘ je nach Standpunkt für eher unwahrscheinlich halten kann, so findet sie doch statt. Vor dem Hintergrund schon existierender (Arbeits)kontakte, insbesondere der wissenschaftlichen Projektpartner aus der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg und aus dem Ökopolinstitut Hamburg, zu verschiedenen Unternehmen der Metallwirtschaft in der Region, war es insofern nicht allzu schwierig, Praxispartner für einen gemeinsamen Projektantrag zu finden. In diesem Stadium war aber auch nicht viel mehr gefordert, als eine noch recht allgemein gehaltene Absichtserklärung auf der Basis des im Wesentlichen von den Wissenschaftspartnern formulierten Projektantrags. Die inhaltlichen Schwerpunkte waren grob umrissen worden, aber die Tragfähigkeit und insbesondere die mögliche Reichweite der Kooperationen waren in dieser Phase noch ziemlich unklar. Insofern gehören die jetzt am Ende der Projektlaufzeit verarbeiteten und reflektierten Erfahrungen über tragfähige und weniger tragfähige Themen, Orientierungen, Strategien und die jeweils damit verbundene Reichweite von Projekten mit Blick auf das Nachhaltigkeitsziel durchaus zu den zentralen Projektergebnissen.

Als Ansatzpunkte für nachhaltigkeitsbezogene Projekte und Kooperationen mit Unternehmen werden bisher vorwiegend folgende Ausgangssituationen, Interessen, Motivlagen und Strategien diskutiert und auch praktisch genutzt:

- a) **Engagierte (Unternehmer)Persönlichkeiten** bzw. stark (ethisch) motivierte Akteure aus Unternehmen, die ohnehin schon für das Nachhaltigkeitsziel engagiert sind. Solche Anknüpfungspunkte sind wichtig. Wer aber allein auf sie setzt, begrenzt seine möglichen Kooperationspartner in extremem Ausmaß. Herausragende Unternehmerpersönlichkeiten mit starkem Engagement für Nachhaltiges Wirtschaften gibt es auch in der Region Hamburg z. B. Herrn Otto, der den Otto-Versand leitet oder Herrn Winter, der den grünen Unternehmensverband BAUM e. V. mitgegründet und geprägt hat.

b) Ethische Branchen und Märkte, in denen die Kunden (bzw. ein relevanter Teil der Kunden) ohnehin schon nachhaltigkeitsbezogene Qualitäten nachfragen, sowohl hinsichtlich der Produkte als auch der Herstellungsprozesse. Solchen ‚ethischen Konsum‘, bei dem die Orientierungen der Kunden an Nachhaltigkeit, Umweltschutz, Gesundheit und sozialer Gerechtigkeit dominieren, gibt es z. B. im Bereich der expliziten Ökoprodukte oder mit Blick auf die Dritte Welt für den ‚Fair-Trade‘ Markt, also im Bereich der Nahrungsmittel, bzw. insgesamt dort, wo sich z. B. die Biobranche erfolgreich etablieren konnte. Auch die Ansätze für eine an der ‚regionalen Identität‘ anknüpfende Regionalvermarktung gehören hier her. Mit Blick auf das Ziel einer ‚nachhaltigen Metallwirtschaft‘ helfen diese Anknüpfungspunkte allerdings nur sehr begrenzt weiter, weil die Firmen der Metallwirtschaft in der Regel ziemlich weit entfernt vom Endkunden agieren. Es handelt sich zumeist um ‚business to business‘ Märkte⁹¹.

c) Kostenvorteile durch Effizienzgewinne insbesondere auf der Basis von Energie- und Stoffstrommanagement.

Hier setzen ja im Kern die Effizienzstrategien an, z. B. mit dem Motto ‚Umweltschutz lohnt sich‘. Die Effizienzstrategie gehört ohne Zweifel zur am weitesten verbreiteten, beliebtesten und scheinbar ‚einfachsten‘ Form einer Win-Win-Win-Strategien, von der alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit gleichermaßen ‚profitieren‘ können. Schon auf Unternehmensebene sind damit aber einige gravierende Probleme verbunden. Das wichtigste Problem ist die Einengung der Betrachtung und Debatte. Wer mit Vorschlägen zur Kosteneinsparung auftritt, muss auch meist vergleichsweise kurzfristige monetäre Erfolge sehr gut begründen können. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass für alle Unternehmen zu allen Zeiten mannigfache Potentiale für Kostensenkungen auf den verschiedensten Ebenen existieren. Nicht das Vorhandensein dieser Potentiale ist der entscheidende Engpass, sondern es ist die Fähigkeit zu ihrer Realisierung. *Die Orientierung auf Innovationsfähigkeit stellt sich somit als Voraussetzung für Erfolge der Effizienzstrategie heraus.*

Wenn Akteure aus Unternehmen in ihren Motiven von vornherein auf verengt gedachte ‚ökonomische Interessen‘ reduziert werden, sind die interessantesten und Erfolg versprechendsten Kooperationsmöglichkeiten schon versperrt, bevor man überhaupt erst angefangen hat. Auf einen kurzen Nenner gebracht bedeutet dies, dass bei der Kooperation mit Unternehmen einerseits selbstverständlich bestimmte ökonomische Grundlogiken zu beachten sind. Dass diese Grundlogiken aber das unternehmerische Handeln einfach ‚determinieren‘, ist ein Mythos. Bei genauerem Hinsehen eröffnen sich beträchtliche Handlungsspielräume. Oder anders ausgedrückt: Dass Unternehmen Gewinne machen müssen, ist völlig klar, aber wie Unternehmen unter den aktuellen Wettbewerbsbedingungen (Marktsättigung, Globalisierung usw.) und politischen und sozialen Rahmenbedingungen (staatliche Regulation, Macht der Öffentlichkeit und zivilgesellschaftlicher Akteure) langfristig erfolgreich Gewinne machen können, scheint heutzutage so unklar zu sein, wie noch nie zuvor. Effizienz- und Stoffstrommanagementstrategien begrenzen sich oft allzu schnell auf Einsparungen von Energie, Material und Kosten entlang einer selbst nicht mehr in Frage gestellten Produkt- oder Technologielinie. Für den längerfristigen Unternehmenserfolg, für die Sicherung von Marktpositionen und vor allem für die Eroberung neuer Märkte sind aber Innovationen in den meisten Fällen sehr viel wichtiger.

Ganz wesentlich ist es auch, Veränderungen zu beachten, die sich in den Bedingungen vollzogen haben, unter denen Unternehmen heute wirtschaften. So hat sich zum Beispiel die Verletzlichkeit von Unternehmen gegenüber öffentlichen Diskursen (in den Medien ausgebreiteten ‚Skandalen‘) im Zuge der Globalisierung und der Herausbildung einer

⁹¹Womit hier auf keinen Fall behauptet werden soll, dass auf business to business Märkten ethische Aspekte keine Rolle spielen würden. Sie spielen nur oft keine ‚dominierende‘ Rolle. In gesättigten Märkten mit intensivem Wettbewerb können, bei vergleichbaren ‚harten‘ Aspekten wie technische Qualität und vergleichbarer Preis, ‚weiche‘ Qualitätsfaktoren (Zusatznutzen und dabei auch ethische Aspekte) auch in business-to-business-Märkten durchaus kaufentscheidend werden.

‚Bürgergesellschaft‘ mit einer starken medialen Öffentlichkeit enorm erhöht. Auch auf den Märkten hat sich in den vergangenen Jahrzehnten viel verändert. Vor dem Hintergrund gesättigter Märkte und eines sich im Zuge der Globalisierung weiter intensivierenden Wettbewerbs stieg die Macht der Kunden und damit wiederum der diese beeinflussenden Öffentlichkeit. Wenn mehrere Unternehmen hinsichtlich technisch-funktionaler Qualität und Preis vergleichbare Produkte oder Dienstleistungen anbieten, können zusätzliche Qualitätsmerkmale kaufentscheidend werden, ggf. auch nachhaltigkeitsrelevante Aspekte des Gesundheits-, Arbeits-, Umwelt- und Verbraucherschutzes. Ein positives Bild des Unternehmens – und bei Markenunternehmen insbesondere der Marke – in der Öffentlichkeit ist wichtig für den Erfolg der ‚Marke‘, für die Kundenbindung, für den Börsenkurs und auch für Chancen, wirklich die besten Mitarbeiter für das Unternehmen zu gewinnen. Die von den Unternehmen erwartete Wahrnehmung ihrer Verantwortung entlang der gesamten Produktlinie ist heute mehr als nur ‚Imagepflege‘, die man genauso gut bleiben lassen könnte. Sie kann entscheidend sein für den Aufstieg oder Niedergang.

Bei der Konzeption gemeinsamer Nachhaltigkeitsprojekte sollte also auf der Akteursseite von einer vergleichsweise komplexen Motivlage in den Unternehmen ausgegangen werden. Bei den Projekten soll es sich zudem auf der Objektseite möglichst um solche handeln, in denen sozusagen exemplarisch die angesprochene zeitliche, räumliche und akteursbezogene Komplexität auf ein konkretes gemeinsam lösbares Problem bezogen werden kann. Wir haben im Laufe der Projektzeit eine ganz Reihe von Praxisansätzen versucht bzw. getestet. Letztendlich durchgesetzt haben sich dann die folgenden Praxis-Projekte „Vermeidung der Störstoffanreicherung im Stahlkreislauf“, „Hochwertige Verwertung von Schleifschlamm“, „Hochwertige Verwertung von Strahlmittelabfällen“, „Minimalmengenschmierung bei der spanenden Metallbearbeitung“, „Nachhaltigkeitscontrolling“, „Leasing und Flottenmanagement von Flurförderfahrzeugen“ sowie „Recyclingorientierte modulare Produktgestaltung“. Das Spektrum reicht also von der Abfallverwertung über Effizienzgewinne, ein hochwertiges Recycling bis hin zur Gestaltung von Produkten und Dienstleistungen. Hinzu kamen noch die ‚Foren‘, die Ringvorlesung und das Forum ‚Nachhaltiges Wirtschaften Hamburg‘

Für das Ziel einer ‚Nachhaltigen Metallwirtschaft‘ gibt es im Bereich der ‚ethischen Märkte‘ oder ‚regionaler Produkte‘ wenig Ansatzpunkte. Auch unser Projekt war auf ‚engagierte Persönlichkeiten‘ angewiesen. Doch wenn man sich von vornherein und vorwiegend auf die Möglichkeiten konzentriert, die von ethischen Märkten und engagierten Persönlichkeiten ausgehen, engt man doch die Reichweite seiner Handlungs- und Erfolgsmöglichkeiten (und im Übrigen auch die Übertragungs- und Verallgemeinerungsfähigkeit der entsprechenden Forschungsergebnisse) sehr stark ein.

In jedem praktischen Projekt kommt engagierten und gewichtigen Promotoren ohne Zweifel eine bedeutende Rolle zu⁹². In den Teilprojekten gab es zum Glück eine ganze Reihe von Personen, die diese Rolle eingenommen haben, und die auf diese Weise die Erfolge dieser Projekte erst ermöglichten. Hierzu gehörten insbesondere: Der Umweltsenator und engagierte Mitarbeiter der Umweltbehörde, zwei dem Kooperations- und Innovationsimpuls „neuer“ Themen gegenüber aufgeschlossene Geschäftsführer von in der Region sehr gut verankerten Fachverbänden (VDMA und Nordmetall), mit anerkannter „Problemlösungskompetenz“ und einem weit gestreuten Kontaktnetzwerk ausgestattete Hochschullehrer, der Vorstandsvorsitzende der größten ortsansässigen Metallhütte, welcher in Personalunion auch wichtige Ämter in den Selbstverwaltungsorganen der Hamburger Wirtschaft wahrnimmt sowie der Umweltbeauftragte dieses Unternehmens, der Umweltbeauftragte eines Herstellers von Flurförderfahrzeugen und nicht zuletzt engagierte Mitarbeiter der Handwerks- und der Handelskammer.

Die jeweiligen Motivlagen, die dazu führten, dass sich diese Promotoren für die verstärkte Verankerung des Nachhaltigkeitsansatzes in der regionalen Wirtschaft engagieren sind sicherlich unterschiedlich. Während die in der Umweltverwaltung Tätigen nach ergänzenden oder auch komplementären Positionierungen zur verwaltungseigenen Verortung im

⁹² Vgl. Hafkesbrink 2003

Themenfeld „Nachhaltiges Hamburg“ suchen, haben die Mitarbeiter in der Verbandsarbeit und auch die im Forschungstransfer tätigen Hochschulmitarbeiter ein Grundinteresse an der Stärkung regionaler Kooperationsnetzwerke. Für die „Metallunternehmer“ stellt sich aus strategischer Sicht offenbar insbesondere die Frage nach dem Bild des Unternehmens in der Öffentlichkeit, nach seiner Verletzlichkeit, nach dem Aktienkurs und nach den zukünftigen Marktchancen. Daneben spielt für ein Großunternehmen die Frage der „Modernität“ und damit auch Attraktivität des Heimatstandortes eine wichtige Rolle.

5.4.3 Zugang zu strategisch relevanten Abteilungen bzw. Funktionsbereichen

Der eigentlich nötige Zugang, um Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit durch Nachhaltiges Wirtschaften im Unternehmen zu verbessern, ist der Kontakt zur Unternehmensstrategie, zur Qualitätssicherung und zur Produktentwicklung, also zu denjenigen Abteilungen, in denen wirklich weit reichende strategische Entscheidungen getroffen werden. Einige unserer Erfahrungen zeigen, dass der Zugang zu diesen Abteilungen nach einem Einstieg in das Unternehmen über die Umweltabteilung – wie er bei der Effizienzstrategie eher vorgegeben ist - oft versperrt bleibt. Nur mit den genannten strategisch bedeutenden Abteilungen können jedoch die längerfristigen Aspekte der *Wettbewerbsfähigkeit und Strategiefähigkeit* des Unternehmens umfassender reflektiert werden. Hier geht es um die Zukunft und Sicherung des Unternehmens (auch des Unternehmenswerts) im sich weiter verschärfenden Wettbewerb. Dort kommen dann auch Faktoren in den Blick, die in den vergangenen Jahren für die Motivationen von Unternehmen für Kooperationen in Nachhaltigkeitsprojekten rasch zunehmende Bedeutung erlangt haben, z. B. das Setzen auf Qualität und Innovation, die radikale Orientierung am Kunden, das Bild des Unternehmens (bzw. der ‚Marke‘) in der Öffentlichkeit, die Vermeidung von Skandalen, der Aktienkurs und dergleichen. Mit der Verlagerung des Ansatzpunktes von Kooperationen von der Effizienz- zur Innovationsstrategie, von der Konzentration auf Kosteneinsparungspotentiale auf die Sicherung und Verbesserung der strategischen Wettbewerbsfähigkeit verändern sich dann auch die Kooperations- und Ansprechpartner innerhalb der Partnerunternehmen.

Zunächst wird oft beim Thema Nachhaltigkeit erst einmal der Umweltbeauftragte, bzw. wenn vorhanden die Umweltabteilung angesprochen und ihr die Zuständigkeit für das Projekt übertragen. Dies liegt zum einen daran, dass unter Nachhaltigkeit immer noch v. a. Umwelt verstanden wird, zum anderen ist aber auch das betriebliche Energie- und Stoffstrommanagement bisher am ehesten dort angesiedelt, insbesondere dann, wenn im Unternehmen Umweltmanagementsysteme nach EMAS oder nach ISO 14000 eingesetzt werden. Die Projekterfahrungen zeigen aber, dass sich der Einstieg über die Umweltabteilung durchaus als Sackgasse herausstellen kann. Die Umweltabteilung hat innerbetrieblich oft nicht die erforderliche Bedeutung und Macht, um wirklich weit reichende Veränderungen in den anderen Unternehmensabteilungen anzustoßen. Strategisch bedeutendere Abteilungen wie die Forschung, die Produktentwicklung, die Qualitätssicherung oder die strategischen Unternehmensführung erreicht man in der Regel nur über die Innovationsstrategie. Selbst ein im Rahmen der Effizienzstrategie verbleibendes Energie- und Stoffstrommanagement bekommt nur dann weit reichenden Einfluss, wenn es in das übergreifende betriebliche Controlling integriert wird.

Für den ersten Zugang zu Einzelbetrieben haben sich im Projektverlauf – abweichend von unserer mittelfristigen Orientierung auf Märkte und Erlöse – zunächst allerdings des Öfteren konkrete Beratungen zur kleinschrittigen Steigerung der Effizienz von Teilprozessen als besonders geeignet erwiesen, indem sie erst eine Vertrauensbasis für weitere gemeinsame Aktivitäten schufen.

Ein Beispiel für eine solche „Türöffner-Aktivität“ aus dem Projektkontext ist die Stoffflussaufnahme im Lackierbereich eines mittelständischen Apparatebauers, die auf eine kostenoptimale und umweltgerechte Abfalltrennstrategie abzielte. Bei derartigen

Maßnahmen handelt es sich meist um klare win-win Situationen⁹³, die sich als deutlich erkennbare „Erfolge“ in der innerbetrieblichen Realität⁹⁴ darstellen.

Vor dem Hintergrund einer Zielstellung, die über den „klassischen“ Umweltschutz hinausgeht und die die regionalwirtschaftliche Nachhaltigkeit von Unternehmen eigentlich in Kriterien wie Innovations-, Wandlungs- und Kooperationsfähigkeit bemisst, ist es allerdings wichtig, dass von vornherein gegenüber „normalen“ betrieblichen Umweltschutzplanungen weitere Aspekte beachtet werden:

- Parallel zur konkreten Lösung der „technischen“ Probleme steht die Einbindung in die übrigen Prozesse der betrieblichen Leistungserstellung von Beginn an im Blickpunkt der Aktivitäten
- Nicht-technische und nicht-stoffliche Prozesse werden dabei gleichrangig berücksichtigt
- Auch Optimierungsmöglichkeiten, die keine ökologischen, sondern ausschließlich ökonomische Effekte haben, also z. B. die Reduzierung von Stillstands- oder Rüstzeiten, werden gleichermaßen geprüft.

Im vorstehend angeführten Beispiel des Lackierbereiches führte dieser erweiterte Blickwinkel zur Identifikation zusätzlicher, relevanter Problembereiche.

- Ein hoher handwerklicher Anspruch der Lackierer und nicht klar definierte (optische) Qualitätsanforderungen führten zu deutlicher „Überqualität“ der gefertigten Oberflächen⁹⁵. Dies schlug sich vor allem in vergleichsweise langen Vorbearbeitungszeiten, aber auch in hohen Verbräuchen von Hilfsmaterialien nieder.
- Da gegenüber den Endkunden und größeren Systemherstellern keine einheitlichen Farbstandards durchgesetzt werden konnten, entstanden durch Überlagerung hohe Mengen entsorgungsbedürftiger Sonderfarbtöne⁹⁶.
- Aufgrund einer schwankenden und meist geringen Auslastung des Lackierbereiches konnte selbst für einfache technische Verbesserungen, wie z.B. den Einsatz von HPLV-Spritzpistolen⁹⁷ nicht sinnvoll eine Amortisation bestimmt werden. Die Verbesserungsinvestitionen wurden aus diesem Grund nicht getätigt.

Diesen durchaus in ähnlicher Form in vielen KMU vorfindbaren Problemlagen ist gemeinsam, dass die jeweiligen Lösungsmöglichkeiten nicht im unmittelbaren Fertigungsbereich, sondern in ganz anderen Abteilungen des Unternehmens liegen, hier konkret im Bereich des Marketing (verursachungsgerechte Preisgestaltung und definierte Qualitätsanforderungen) oder in der Geschäftsführung (Möglichkeit der Auslastungsoptimierung durch externe Vermarktung der Lackierleistung).

Zur Erschließung derartiger Optimierungspotentiale sind abteilungsübergreifende Abstimmungen und Aushandlungsprozesse notwendig, die im normalen Betriebsablauf nicht stattfinden, und für die vielfach auch kein geeigneter innerbetrieblicher „Ort“ vorhanden ist⁹⁸.

⁹³ Bzw. sogar win-win-win Situationen, wenn sich neben den Umwelt- und Kostenentlastungseffekten auch noch positive Auswirkungen z.B. auf die Arbeitssicherheit oder die Mitarbeitergesundheit ergeben.

⁹⁴ D.h. heißt sie folgen der einzelwirtschaftlichen Logik und sind auch in den üblichen Controllingstrukturen von KMU unmittelbar als Minderung von Fertigungskosten und (Verbrauchs-) Mengen erkennbar

⁹⁵ So wurden z.B. Gehäuse-Innenseiten von Mahlwerken aufwendig lackiert, obgleich dieser Farbauftrag bereits im Probelauf abrasiv abgetragen wird. Doch „der Kunde will ein rundum ansprechendes Produkt“.

⁹⁶ Farbstanteile von bis zu 45% der eingekauften Gesamtfarbmenge, werden in der Fertigung achselzuckend als gegeben akzeptiert, „da der Vertrieb/das Marketing dem Kunden ja alles verspricht“. Preisvorteile für Standardlackierungen bzw. Aufschläge für Sonderlackierungen werden nicht realisiert.

⁹⁷ Mit einer solchen High-Pressure Low Volumen Applikationstechnik kann der so genannte „overspray“ also der Auftragsverlust auf einfache Art und Weise signifikant reduziert werden.

⁹⁸ Sowohl bei einem Teil der klein und mittelständig organisierten Projektpartner-Betriebe, als auch

Die Bearbeitung des konkreten Optimierungsprojektes bietet somit die Chance zu Initiierung eines informellen innerbetrieblichen Austausch-Forums über weitere Verbesserungsbedarfe oder –möglichkeiten.

In Abbildung 4 sind schematisch Aspekte der Aufbauorganisation eines Unternehmens dargestellt. Jede Abteilung hat ihr spezifisches Leitbild mit der entsprechenden Zielstellung und Methoden. Die Mitarbeiter haben in der Regel eine ähnliche disziplinäre Ausbildung und darüber eine spezifische Denkweise und Sprache. Das Controlling denkt beispielsweise vorrangig an den Return-of-Investment (ROI), die Marketingabteilung an Marktanteile und der Service an Kundenzufriedenheit und -bindung. Neben nicht zu unterschätzenden individuellen und Unternehmenskultur bedingten Faktoren haben diese abteilungsspezifischen Besonderheiten einen starken Einfluss auf das optimale Konzept für den Zugang zum Unternehmen.

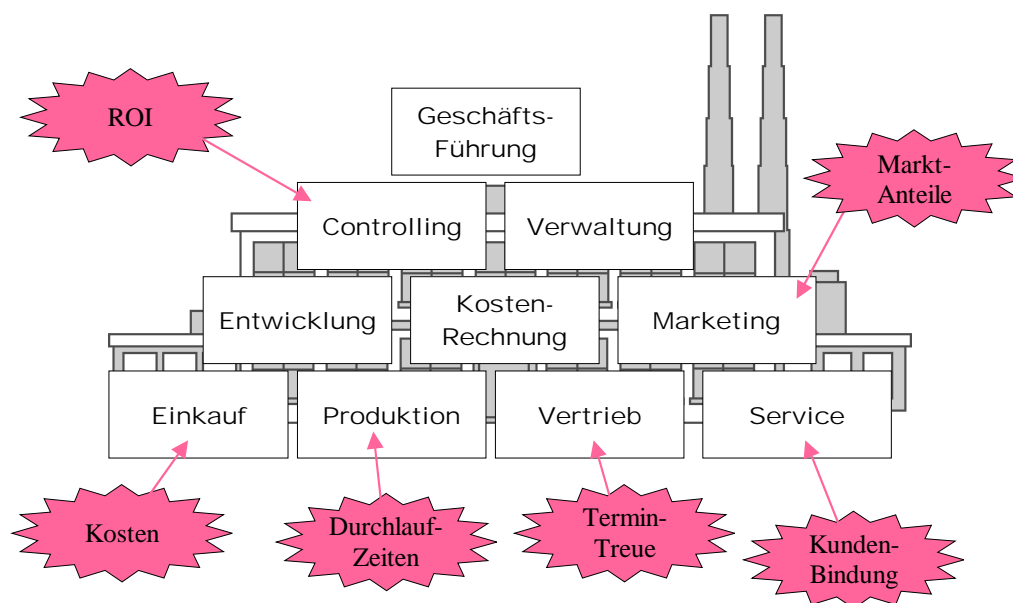


Abbildung 4_Aufbauorganisation eines Unternehmens mit unterschiedlichen Anknüpfungspunkten für Nachhaltigkeitsstrategien

5.4.4 Zwischenfazit

Bei allen Projekterfolgen bleibt allerdings eine immense Lücke zwischen dem, was konkret gemacht werden konnte, und den hochgesteckten Ansprüchen an ‚bedeutende‘ Schritte in Richtung Nachhaltigkeit oder gar eine Moderation von komplexen Innovationssystemen. In den meisten Fällen reichte die Kooperation über die Zusammenarbeit zwischen einigen wenigen Unternehmen einerseits und den Forschungseinrichtungen andererseits nicht hinaus. Umso wichtiger wurden deshalb das Forum und die Ringvorlesung ‚Nachhaltige Metallwirtschaft‘ und das ‚Forum Nachhaltiges Wirtschaften Hamburg‘⁹⁹. Für beide ‚Plattformen‘ ist typisch, dass sie sich stark auf eine breitere regionale (Fach)Öffentlichkeit hin orientier(t)en, dass sie nicht einzelbetrieblich orientiert (und dominiert) waren, und dass sie erst in einer gewissen ‚Distanz‘ zum Alltagsgeschäft der Unternehmen zum Tragen kamen.

Auch wenn also die hochfliegenden Ansprüche eines ‚Managements‘ bzw. einer ‚Moderation‘ ‚Regionaler Innovationssysteme‘ nicht erfüllt werden konnten, so konnte doch Einiges erreicht werden. Das Erfolgsrezept des Projekts ‚Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg‘

bei einigen der größeren Häuser gab es keine routinemäßigen Abstimmungsgespräche zwischen allen Fachabteilungen der Unternehmen.

⁹⁹ Die Vorträge der Ringvorlesung bildeten die Grundlage für den Sammelband ‚Sustainable Metals Management‘, von Gleich; Ayres; Gößling-Reisemann (eds.) 2004

scheint dabei gerade in der Kombination zweier strategischer Ansätze gelegen zu haben, einerseits einer weit gefassten Konzeption von Stoffstrommanagement, die im Wesentlichen auf langfristige ‚Ressourcensicherung‘ fokussierte (und sich dabei auch von der Region zunehmend ‚emanzipierte‘) und andererseits einer Innovationsstrategie, die sich auf die Nutzung und Verbesserung der Vorteile der regionalen ‚home base‘ der regionalen Akteursbeziehungen (Innovationssysteme) der Hamburger Metallwirtschaft konzentrierte.

Nach diesem sehr knapp gehaltenen Überblick über den strategischen Ansatz und auch schon über einige praktische Ergebnisse des Modellprojekts geht es in den nun folgenden Kapiteln um eine vertiefte theoretische Durchdringung der Problematik eines möglichst nachhaltigen Umgang mit der nicht-regenerierbaren Ressource Metalle (Kapitel 6), um die Darstellung der Ergebnisse der Methodenentwicklung (Kapitel 7) sowie um die Darstellung der Ergebnisse der in Kooperation mit Unternehmen voran getriebenen Umsetzungsprojekte (Kapitel 8).

6 Metalle als Werkstoff und Ressource

Der Gruppe der Metalle werden ungefähr 2/3 aller auf der Erde natürlich vorkommenden chemischen Elemente zugerechnet. Nur die wenigsten von ihnen – vorwiegend die Edelmetalle – kommen allerdings auch ‚gediegen‘, d. h. in metallischer Form in der Natur vor. Metalle werden insbesondere als Werkstoffe geschätzt. Zu den wichtigsten Metalleigenschaften gehören Glanz (Metallglanz, hohes Reflektionsvermögen), gute elektrische und Wärmeleitfähigkeit, hohe Festigkeit, Härte und Belastbarkeit sowie gute plastische Verformbarkeit. Diese Eigenschaften beruhen auf der spezifischen metallischen Bindungsform, bei der die an der Bindung beteiligten Atome ihre äußeren Elektronen in ein gemeinsames ‚Elektronengas‘ abgeben. Dort sind sie nur relativ lose gebunden und können daher leicht verschoben werden. Das ‚Elektronengas‘ wiederum führt dazu, dass die Atomrümpfe im Kristallgitter dicht gepackt vorliegen, was – in Verbindung mit vorhandenen Gitterfehlern – die gute Verformbarkeit bewirkt. Die ebenfalls metall-typische Legierungsfähigkeit beruht darauf, dass im Gitter die Atomrümpfe in bestimmten Grenzen leicht durch andersartige ersetzt werden können.

Man kann die Metalle nach ihrem spezifischen Gewicht und nach ihrem Schmelzpunkt einteilen. Zu den technisch bedeutenden Leichtmetallen gehören z. B. Magnesium, Aluminium und Titan, zu den niedrig schmelzenden Schwermetallen z. B. Zink, Cadmium, Zinn, Blei und Quecksilber. Zu den hoch schmelzenden Schwermetallen gehören Eisen, Chrom, Kobalt, Nickel, Platin und Palladium und zu den sehr hoch schmelzenden Wolfram, Tantal, Molybdän und Niob. Die Edelmetalle Silber, Gold und die Gruppe der Platinmetalle zeichnen sich durch besonders große Korrosionsbeständigkeit aus.

6.1 Faszination und Nutzen der Metalle

Metalle haben in der Geschichte der Menschheit eine zunehmend bedeutende Rolle gespielt. Die ‚gediegen‘ vorkommenden Metalle scheinen die Menschen ‚von Anfang an‘ fasziniert zu haben. Gold ist in vielen Kulturen zum Synonym für Wert geworden. Das Geld entwickelte sich auf der Basis metallischer Münzen. Erst gegen Ende des 20. Jh. wurde der ‚Geldwert‘ vom ‚Goldwert‘ entkoppelt. Gediegen gefundenes Gold, Silber und Kupfer konnte mit vergleichsweise einfachen technischen Mitteln zu Schmuck verarbeitet werden¹⁰⁰. Die frühgeschichtliche Entwicklung der Metallurgie, der Fähigkeit zur Gewinnung von Kupfer bzw. Bronze (eine wesentlich härtere Kupfer-Zinn-Legierung) und dann von Eisen aus Erzen markieren Zäsuren in der Menschheitsgeschichte, so dass ganze Epochen nach diesen

¹⁰⁰ Der Gebrauch von Goldschmuck lässt sich durch Funde schon seit ca. 20.000 Jahren, Kupferschmuck seit 6000 Jahren nachweisen (vgl. Wellmer; Wagner 2004)

Werkstoffen benannt wurden¹⁰¹, wie die auf die Steinzeit folgende Bronzezeit (ca. 2700 bis ca. 1200 v. Chr.) und die darauf folgende Eisenzeit. Während sich der Einsatz der Bronze noch weitgehend auf Kultgegenstände, Schmuck und Waffen konzentrierte, lag das Haupteinsatzgebiet von Eisen und Stahl neben der Waffentechnik zunehmend im Bereich der Werkzeuge und Gebrauchsgegenstände.

Mit Blick auf seine kulturelle, technische und ökonomische Bedeutung scheint mittlerweile beim Übergang ins 3. Jahrtausend das Eisen- und Stahlzeitalter den Zenit überschritten zu haben. Es wird seit Jahren viel über den Übergang zur ‚Informationsgesellschaft‘ gesprochen, als deren Basis Kupfer und v. a. Silizium eine große Bedeutung haben. Kohle, Eisen und Stahl standen dagegen im Zentrum der industriellen Revolution in der ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts. Sie prägten ganze industrielle Ballungszentren wie in Deutschland das Ruhrgebiet. Auch hierbei spielte die Waffentechnik eine wichtige Rolle für die technische Weiterentwicklung. Am Bedeutungsgewinn der Leichtmetalle ist maßgeblich der Fahrzeug- und Flugzeugbau beteiligt.

Mit der Fähigkeit zur Erzeugung und Nutzung von Elektrizität gewann die elektrische Leitfähigkeit von Metallen, insbesondere von Kupfer, rasant an Bedeutung. Zu den besten elektrischen Leitern zählen Silber, Kupfer, Gold und Aluminium. Technisch wurde und wird in der Regel Kupfer eingesetzt, an besonders ‚heiklen‘ Kontakten in der Computertechnik auch mal Gold und Silber, in Überlandleitungen aus Gewichts- und Kostengründen Aluminium. Mit der Elektronik und Halbleitertechnik, mit Telekommunikation, Unterhaltungselektronik und Computertechnik sowie der Photovoltaik kommen weitere, z. T. noch viel seltenere Metalle ins Spiel, z. B. Selen, Gallium, Indium und Germanium. Die Platingruppenmetalle werden immer wichtiger im Rahmen ihrer Einsatzmöglichkeiten als Katalysatoren (z. B. in der chemischen Prozesstechnik, im Emissionsschutz und demnächst wohl auch in Brennstoffzellen).

Mit dem Leichtbau, als Ansatz zur Verminderung von Energieverbrauch und Emissionen, gewinnen Aluminium, Titan und Magnesium an Bedeutung. Und für den Hochleistungseinsatz bzw. für besonders extreme Bedingungen (z. B. hinsichtlich Temperatur, Leitfähigkeit und Korrosivität) werden immer ausgeklügeltere Legierungen entwickelt. Damit rücken verstärkt neben klassischen Legierungsmetallen wie Vanadium, Chrom, Nickel, Mangan, Wolfram und Molybdän, auch Metalle in den Blick, die heute noch eher selten Verwendung finden, wie z. B. Antimon, Lithium, Niob, Hafnium, Yttrium und Tantal. Wichtige, schon heute wahrnehmbare Tendenzen, die zu weiteren Verschiebungen und Diversifizierungen bei der Nachfrage innerhalb der Metalle führen dürften, sind darüber hinaus ‚intelligente‘, d. h. sich anpassende Materialien (smart materials) im Bereich der Strukturwerkstoffe, die Nutzung ihrer elektromagnetischen Eigenschaften im Bereich der Funktionswerkstoffe und nicht zuletzt die Nutzung der katalytischen Funktionen von Metallen bei der Stoffumsetzung.

Deutlich wird damit dreierlei, erstens Verschiebungen der technischen und ökonomischen Relevanz innerhalb der Gruppe der Metalle, zweitens eine Zunahme der Vielfalt des Metalleinsatzes. Und drittens dürfte trotz der Möglichkeiten zur Substitution von Metallen (z. B. durch Kunststoffe) und trotz Verbesserung der Ressourceneffizienz und Miniaturisierung im Elektronikbereich die Herstellung und Verwendung von Metallen insgesamt, auch im ‚elektronischen Zeitalter‘ weiter zunehmen. Alles deutet auf eine weiter steigende Nachfrage nach Metallen hin, innerhalb der Industrienationen und erst recht - im Zuge der ‚Nachindustrialisierung‘ bzw. nachholenden Entwicklung - in den Schwellen- und Entwicklungsländern. Der Bedarf an Metallen wird quantitativ und qualitativ weiter steigen, es werden größere Mengen, und es werden immer mehr verschiedene Metalle und Metalllegierungen nachgefragt werden. Damit stellt sich die Frage, ob und wie diese zukünftigen Bedarfe auf eine nachhaltig zukunftsfähige Art und Weise befriedigt werden können.

¹⁰¹ Seit ungefähr 3500 v. Chr. ist die metallurgische Gewinnung von Kupfer aus Kupfererzen nachweisbar. Funde von Bronzewerkzeugen reichen zurück bis mindestens 3000 v. Chr. Funde von Eisenwerkzeugen datieren zurück bis 1400 v. Chr. (vgl. Wellmer; Wagner 2004).

6.2 Stoffströme - Entwicklungstendenzen der Herstellung und Verwendung von Metallen

Im Jahre 1998 wurden weltweit insgesamt ca. 320 Milliarden Tonnen nicht regenerierbarer Mineralien und Energieträger gefördert und statistisch erfasst. Davon entfielen ca. 6,3 Milliarden Tonnen auf Metalle, das entspricht knapp 2 % der Gesamtmenge (vgl. Abbildung 5). Zum Vergleich: Auf fossile Energieträger entfielen allein 32,9 %. Dass nur zwei Gewichtsprozent der gesamten globalen Fördermenge auf die Metalle entfallen, mag zunächst erstaunen. Hier sind allerdings nur die tatsächlich gewonnenen Metallmengen berechnet worden. Nicht enthalten sind z. B. um die Mengen an Abraum, die entfernt bzw. abgetrennt werden müssen, um das Erz abzubauen, die Mengen an nicht-metallhaltigem Begleitgestein, das aufgewendete Wasser und die Schlämme aus den Anreicherungsanlagen sowie die entsprechenden Begleitstoffströme der Energiebereitstellung und des Energieeinsatzes. Die gesamten 'ökologischen Rucksäcke'¹⁰² der Metallgewinnung sind also in diesen Zahlen nicht enthalten. Je nach Zugänglichkeit, Abbautechnik und vor allem Metallkonzentration des Erzes muss zu den gefördert Metallmengen ein ökologischer Rucksack in der Größenordnung von 1:350.000 für Gold und Platin, 1:7500 für Silber, 1:420 für Kupfer und 1:14 für Eisen dazu gerechnet werden¹⁰³.

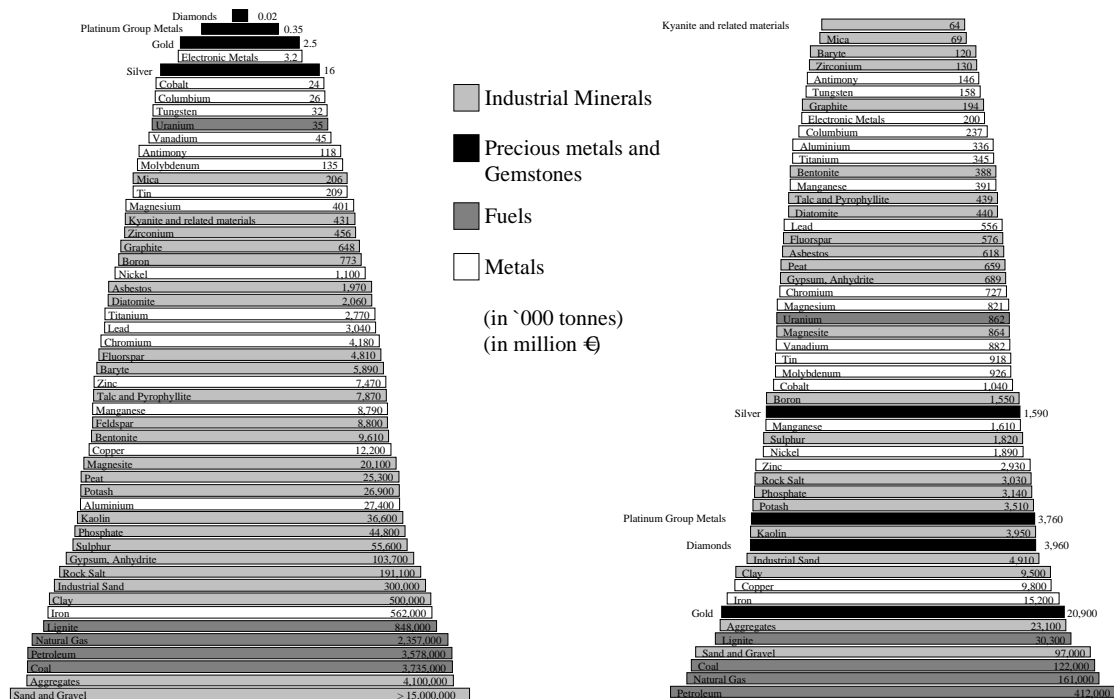


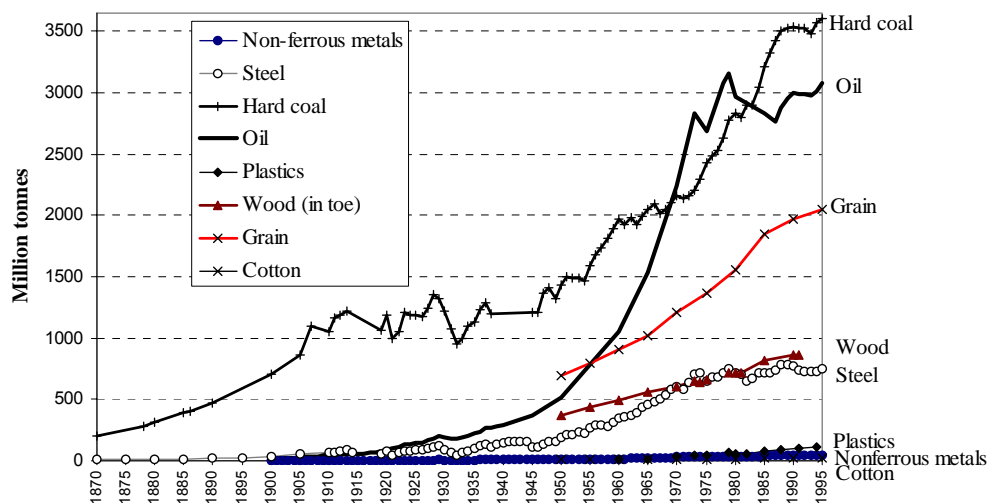
Abbildung 5_Produktionsmengen und -werte mineralischer Rohstoffe (weltweit im Jahr 1998)
Aus: Wellmer; Wagner 2004

¹⁰² Der Begriff 'ökologischer Rucksack' geht auf Arbeiten von Schmidt-Bleek am Wuppertalinstitut zurück. Er ist definiert als die Masse, die insgesamt 'bewegt' werden muss, um eine bestimmte Masse eines Produktes – in diesem Fall Metall – herzustellen. Mit Bezug auf die jeweilige 'Nutzeneinheit' wurde auf dieser Basis das Konzept 'material input per service unit' (MIPS) entwickelt. Im internationalen Raum scheint sich derzeit für eine solche integrierende Betrachtung von Stoffströmen die Bezeichnung 'material input' bzw. 'material intensity' (MI) durchzusetzen, vgl. Schmidt-Bleek 1993a und 1993b sowie 1994.

¹⁰³ Schmidt-Bleek 1994

Wenn man im Vergleich dazu die mit den geförderten Rohstoffmengen verbundene Wertschöpfung darstellt, kann man feststellen, dass sich im Wert der gewonnenen Rohstoffe der mit der Rohstoffprospektion und –aufbereitung verbundene energetische und stoffliche Aufwand wenigstens teilweise widerspiegelt. Den 1998 geförderten ca. 320 Milliarden Tonnen nichtregenerierbarer Mineralien und Energieträgern entsprach ein ungefähre Geldwert von 8,2 Billionen €, wovon ungefähr knapp 8% auf Metalle entfielen. Wenn man den jeweiligen prozentualen Anteil der Metalle an der geförderten Gesamtmengen aller mineralischer Rohstoffe, also in diesem Fall den 2%igen Anteil an der Gesamtmenge, zu dem 8%igen Wertanteil der Metalle am Gesamtwert zueinander in Relation setzt kommt man zu einem Mengen-Wertverhältnis von 1:4. Fossile Energieträger schlagen bei der Menge mit 32,9% der Gesamtmenge und beim Geldwert mit 88,5% des Gesamtwerts zu Buche. Was einem entsprechend berechneten Mengen-Wertverhältnis von 1:2,7 entspricht¹⁰⁴. Besonders anschaulich sind die Mengen-Wert-Verhältnisse bei Kupfer (1: 3000) und Diamanten (1:7900), was zumindest zum Teil auch die geringen Konzentrationen im Muttergestein widerspiegelt.

Die Entwicklung hin zu diesen heutigen Stoffumsätzen und Produktionsmengen ist durch ein sich insgesamt beschleunigendes Wachstum gekennzeichnet (vgl. die Abbildung 6 und Abbildung 7). Dieses Wachstum der Produktionsmengen folgt in grober Auflösung recht gut dem allgemeinen Wirtschaftswachstum.

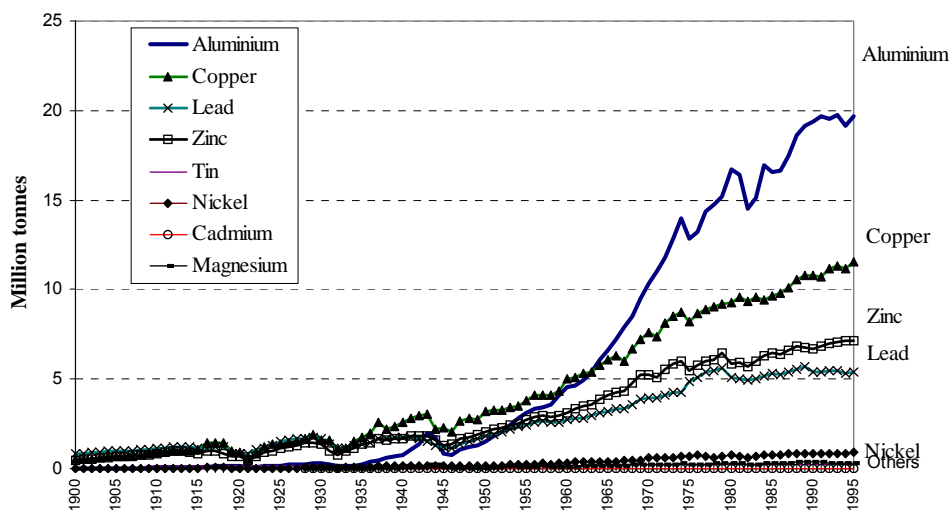


**Abbildung 6_Globale Produktion bedeutsamer Ressourcen 1870–1995 (Mio. t)
(Aus: Messner 2004)**

Erläuterungen und Quellen¹⁰⁵

¹⁰⁴ Wenn man allein den Aufwand betrachtet, müsste dieses Verhältnis eigentlich noch wesentlich kleiner sein. Hier spielen wohl andere Marktfaktoren (z. B. die kartellartige Struktur der OPEC) eine größere Rolle.

¹⁰⁵ NB: 'toe' stands for "tons of oil equivalent" and quantifies wood (which is usually measured in cubic metres) in terms of its energy content in equivalent quantities of oil. Data sources: Metallgesellschaft AG/World Bureau of Metal Statistics (publisher) 1996, Wirtschaftsvereinigung Stahl (publisher) 1996, Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 1996, Clark 1990, Tippee (publisher) 1997, Glenz 1989, Forest Products Society (publisher) 1994 Alexandros (publisher) 1995, FAO (publisher) 1969–1996.



**Abbildung 7_ Globale Produktion von Nichteisenmetallen 1900–1995 (Mio t)
(Aus: Messner 2004)**

Quelle: Metallgesellschaft AG/World Bureau of Metal Statistics 1996, pp. 60–65.

Weder das Wirtschaftswachstum noch die Entwicklung der damit verbundenen Stoff- und Energieumsätze waren allerdings so stetig, wie es z. B. durchschnittliche Wachstumsraten suggerieren. Beide Entwicklungen zeigen - neben immer wieder historisch (z. B. Kriege) bzw. konjunkturell bedingten Einbrüchen oder Wachstumsschüben - zwei besonders intensive Wachstumsphasen und einen typischen Knick. Besonders bedeutsam sind:

1. Die Phase der ursprünglichen intensiven Industrialisierung ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts
2. Die bisher steilste Wachstumsphase nach dem zweiten Weltkrieg in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts
3. Ein Knick in dieser steilen Zunahme Mitte der 70er Jahre. Dieser Knick wird oft mit dem Ölpreisschock (sog. Ölkrise) gefolgt von einem konjunkturellen Einbruch in Zusammenhang gebracht
4. Eine Phase in den 90er Jahren, in der einige Autoren glauben eine tendenzielle Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom damit verbundenen Rohstoff- und Energieverbrauch beobachten zu können¹⁰⁶.

Unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten, d. h. insbesondere mit Blick auf den Verbrauch nicht-regenerativer Ressourcen und die damit verbundenen Emissionen und Abfälle wäre eine solche Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch selbstverständlich äußerst willkommen. Diese Hoffnung stützt sich auf eine ganze Reihe von Annahmen:

1. Der wirtschaftliche Strukturwandel führt zu einer Schwerpunktsverschiebung in den tertiären Sektor, wobei die Entwicklung hin zu einer Dienstleistungsgesellschaft mit einer Verringerung der Stoff- und Energieströme und der mit diesen verbundenen Umweltbelastungen einhergeht (vgl. Jähncke et al. 1992).

¹⁰⁶ Vgl. die in der folgenden Auflistung genannten Autoren. Für eine methodenkritische Bewertung vgl. Cleveland; Ruth 1999

2. Eine tendenzielle ‚Dematerialisierung‘ des Wirtschaftens ist prägendes Element in der Informationsgesellschaft, verbunden mit der in der Informationstechnik besonders deutlich beobachtbaren Miniaturisierung (Heiskanen et al 2000 und 2001).
3. Die der allgemeinen wirtschaftlichen Logik folgenden Rationalisierungsbemühungen erfassen auch den Umwelt- und Ressourcenverbrauch. Sie richten sich stärker auf Effizienzsteigerungen mit Blick auf Stoff- und Energieströme, also auf eine Verbesserung der Ressourceneffizienz durch bessere Ressourcenausnutzung, höhere Wirkungsgrade, höhere Recyclingraten, Nutzungsintensivierung und Nutzendauerverlängerung von Produkten (Schmidt-Bleek 1994, Stahel 1994 und 1999).
4. Basisinnovationen (technologische Pfadwechsel) eröffnen immer wieder neue Möglichkeiten für sehr weit reichende Verbesserungen der Ressourcenproduktivität einschließlich der nach jeder Innovation immer wieder von neuem einsetzenden ‚allgemeinen Lernkurve‘ zur schrittweisen Verbesserung der Effizienz (Huber 2000).

Doch die Wirklichkeit sieht leider anders aus. Nach wie vor steigt (zumindest global) der Ressourcenverbrauch. Von dessen Wachstumsraten gehen sowohl unter dem Aspekt des Ressourcenschutzes als auch mit Blick auf die damit verbundenen Umweltbelastungen nach wie vor die gravierendsten Herausforderungen aus für jede Strategie in Richtung auf eine nachhaltige Metallwirtschaft. Der wirtschaftliche Strukturwandel hin zu einer größeren Bedeutung von Dienstleistungen, die Informatisierung und Miniaturisierung, Basisinnovationen, Lernkurveneffekte und eine graduelle Verbesserung der Ressourcenproduktivität sind zwar alles denkbare und z. T. auch beobachtbare Prozesse. Allerdings scheinen alle bisherigen Versuche, eine ‚allgemeine‘ Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch auch statistisch signifikant zu belegen, einer methodenkritischen Untersuchung nicht Stand halten zu können (vgl. Cleveland, Ruth 1999). Das bedeutet, dass zwar in bestimmten Bereichen hin und wieder wirtschaftlich immanente (d. h. ohnehin ablaufende) Tendenzen den Nachhaltigkeitszielen entgegenkommen können. Es ist und bleibt aber ziemlich unwahrscheinlich, dass sich auf diese Weise die Nachhaltigkeitsprobleme quasi von selbst lösen.

Wie stark sich gerade erst in den vergangenen fünf bis sechs Jahrzehnten der Materialverbrauch der Weltwirtschaft erhöht hat, mag der Hinweis illustrieren, dass die Menschheit nach heutiger Kenntnis seit dem Ende des zweiten Weltkriegs mehr mineralische Rohstoffe verbraucht als in ihrer ganzen Geschichte davor. Eine entsprechend langfristige Betrachtung über die Entwicklung der globalen Kupferproduktion in den vergangenen 5000 Jahren zeigt in logarithmischer Darstellung die Abbildung 8¹⁰⁷.

¹⁰⁷ Aussagen über einen so langen Zeitraum müssen ohne Zweifel mit immensen Datenproblemen behaftet sein

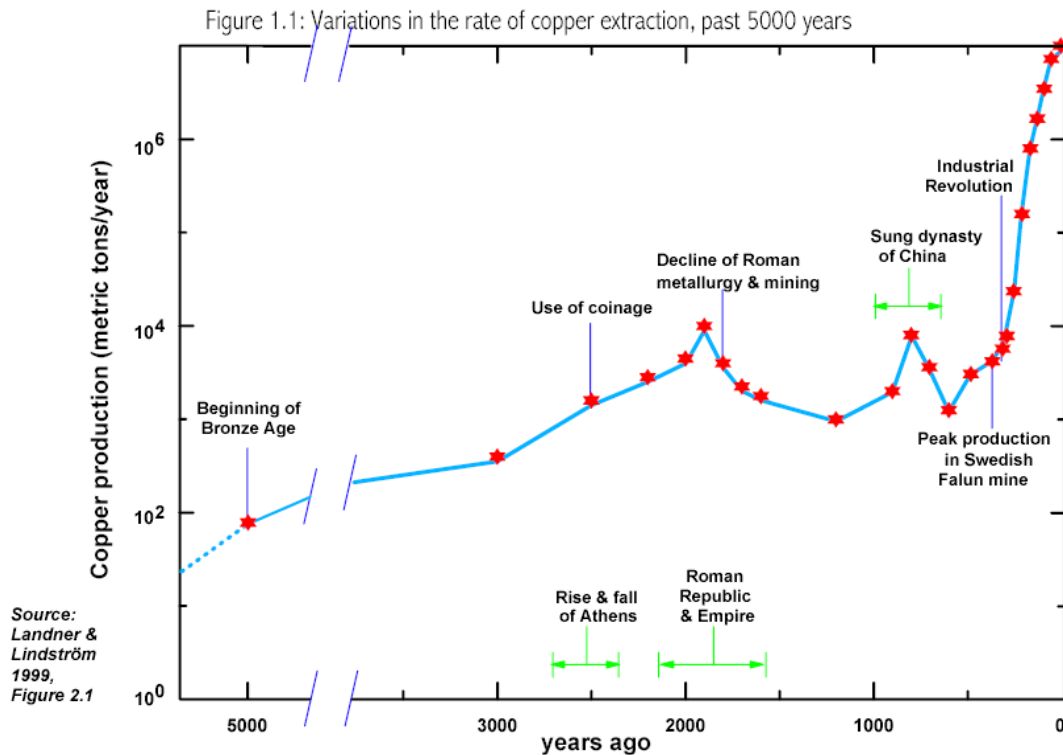


Abbildung 8_Globale Entwicklung der Kupfergewinnung in den vergangenen 5000 Jahren (Aus: Ayres et al 2002 auf Basis Landner; Lindeström 1999).

Eine wohl schon auf etwas verlässlicheren statistischen Zahlen basierende Entwicklung der Kupferproduktion in der ‚Westlichen Welt‘ zwischen 1810 und 1995 zeigt die Abbildung 9.

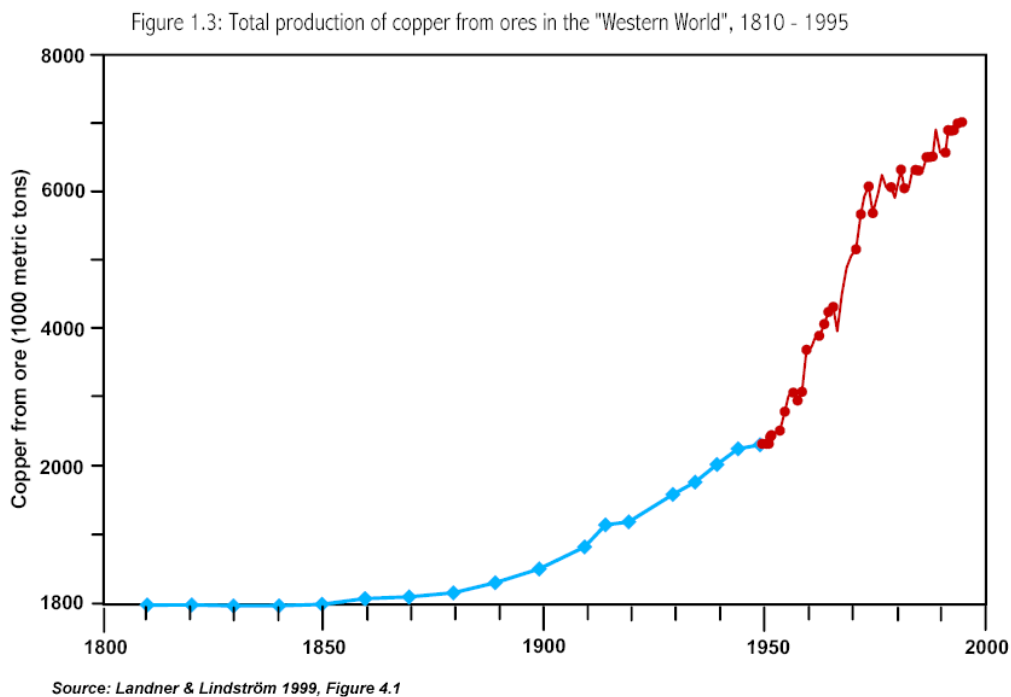


Abbildung 9_ Kupfergewinnung zwischen 1810 und 1999 ‚Westliche Welt‘ (Aus: Ayres et al 2002 auf Basis Landner&Lindeström 1999).

Die globale Primär-Kupferproduktion im 20. Jh. zeigt schließlich Abbildung 10. Gerade auf den letztgenannten Darstellungen sind der große Wachstumsschub seit Beginn der 50er Jahre, der 70er-Jahre-Knick und das danach sich vergleichsweise ungebrochen fortsetzende Wachstum recht gut zu erkennen.

Globale Primärproduktion von Kupfer

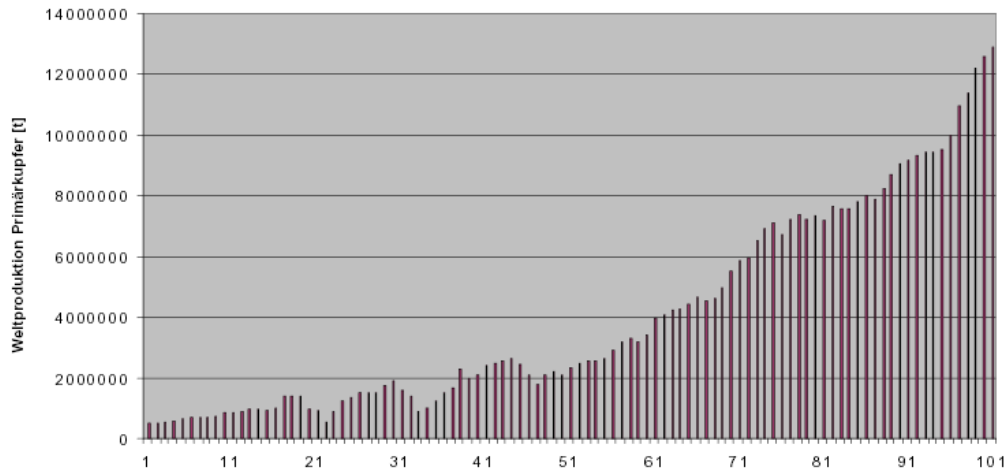


Abbildung 10_ Globale Primär-Kupferproduktion im 20. Jahrhundert
(x-Achse = Jahreszahlen) (aus: Handke 2002)

Bemerkenswert ist, dass all diese eminent steigenden Nachfrageschübe nicht mit entsprechenden Preisanstiegen verbunden waren. Im Gegenteil, von einem ökonomischen Knappheitssignal ist weit und breit nichts in Sicht. Die inflationsbereinigte Preisentwicklung für Kupfer zeigt – allerdings bei großen Ausschlägen nach oben und unten - von 1870 bis 2000 im Schnitt eine kontinuierlich fallende Tendenz (vgl. Abbildung 11).

Figure 3.5: Price of copper on the New York market, 1870 - 2000
(cents per pound in current and constant 1987 US dollars)

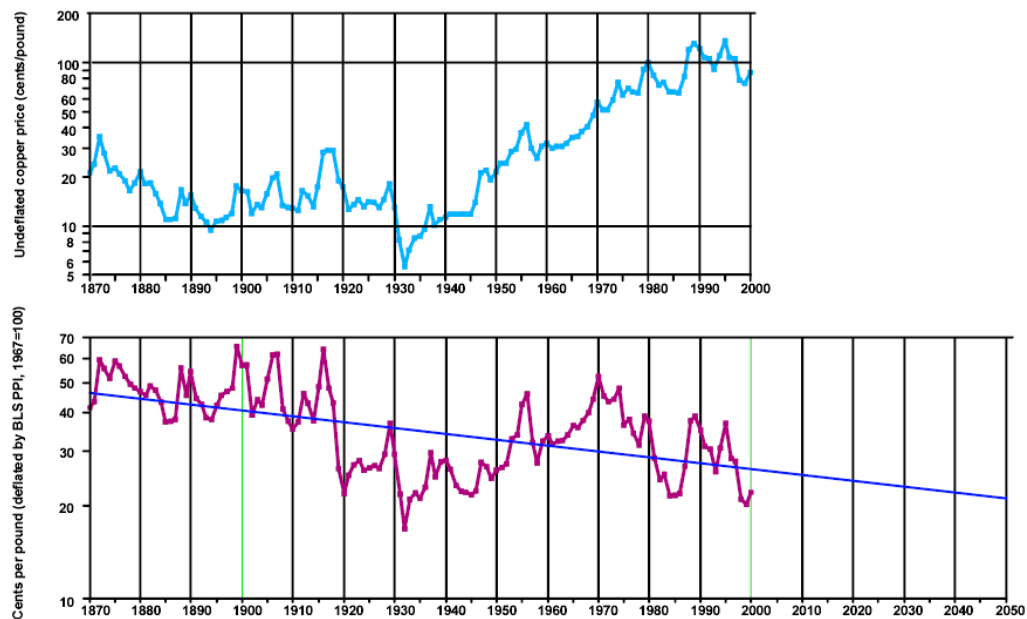


Abbildung 11 Preisentwicklung beim Kupfer 1870 bis 2000
(Aus: Ayres et al 2002)

Die Kupfer produzierenden Unternehmen haben also ihre Produktion immer weiter gesteigert und dabei eher einen tendenziellen Preisverfall in Kauf genommen. Sie konnten (und mussten) den mit der entsprechenden Angebotssteigerung und Wettbewerbsintensivierung verbundenen tendenziellen Preisverfall allerdings durch gesteigerte Produktivität, insbesondere durch Skalenerträge aber auch durch höhere Ausbringungsraten des Kupfers aus dem Erz wieder wettmachen. Dass dies offenbar gelungen ist, ist um so bemerkenswerter, als in derselben Zeit der durchschnittliche Kupfergehalt in den abgebauten Erzen stark abgenommen hat, in den USA zwischen 1900 und 2000 von 2,1 auf 1,5 %, im Weltdurchschnitt zwischen 1949 und 2000 von 4,0% auf 1% (vgl. Wellmer; Dalheimer 2001).

Um die Frage nach den zukünftigen Bedarfen und nach der zukünftigen Verfügbarkeit metallischer Ressourcen etwas besser einschätzen bzw. beurteilen zu können, lohnt sich somit einerseits ein Blick in die Geschichte - auf die global bisher schon produzierten Metallmengen - und andererseits in die Zukunft auf die erwartbare Nachfrage, wenn z. B. die derzeitigen Entwicklungs- und Schwellenländer ihr Konsumniveau an das der Industrieländer angleichen werden. Beides sind natürlich ebenfalls vergleichsweise unsichere Spekulationen. Die bis heute weltweit geförderte Menge Kupfer wird z. B. auf ca. 434 Mio. Tonnen geschätzt. Eine interessante Frage ist, wie viel davon heute noch im Umlauf und damit im Prinzip verfügbar ist, und noch interessanter ist die Frage, welchen Anteil des Vorrats an zugänglichen Erzen mit einer bestimmten Mindestkonzentration wir schon verbraucht haben. Mit Blick auf die zukünftigen Konsumniveaus könnte eine pro Kopf-Betrachtung für eine erste Näherung weiter helfen. So schätzt z. B. Karlsson die globalen Bleireserven auf 7 Kg pro Kopf, die Reservebasis auf 12 Kg pro Kopf und die globalen Ressourcen auf 140 Kg pro Kopf. Er stellt dies dann ins Verhältnis zu den 290 Kg pro Kopf, die zwischen 1880 und 1980 netto in die Schwedische Ökonomie eingebracht wurden¹⁰⁸.

Für die meisten Metalle muss, zumindest global, von einer weiter steigenden Nachfrage und Produktion ausgegangen werden. Weder sind auf der Nachfrageseite Sättigungssignale, noch sind auf der Angebotsseite Knappheitssignale in Sicht. Bei dem einzigen

¹⁰⁸ vgl. Karlsson 2004. Eine Klärung der Begriffe Reserven, Reservebasis und Ressourcen erfolgt in Kapitel 6.3.2.

Massenmetall, bei dem sich zumindest zwischen Mitte der 70er Jahre und 1998 ein bemerkenswerter - womöglich nicht nur vorübergehender - globaler Rückgang der Primärproduktion feststellen lässt, handelt es sich um Blei (vgl. Abbildung 12).

Weltproduktion an Primärblei

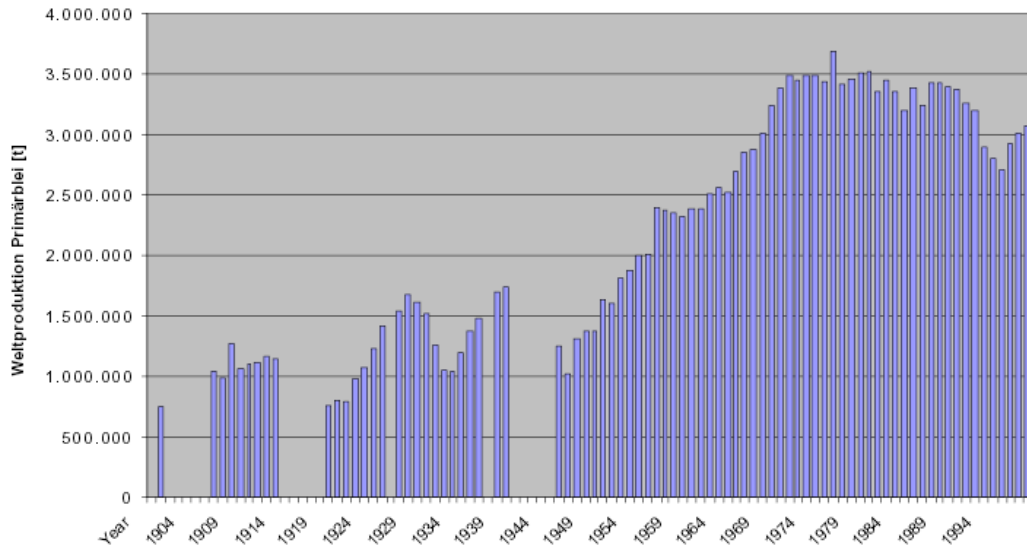


Abbildung 12 Weltproduktion an Primärblei im 20. Jh.
(Aus: Erdmann 2002)

Dieser Rückgang dürfte aber im Wesentlichen auf zwei bleispezifische Gründe zurückzuführen sein, erstens die regulativ erzwungene drastische Einschränkung der umweltoffenen dissipativen Nutzung von Blei (z. B. als Benzinzusatz) vor dem Hintergrund seiner extrem problematischen toxikologischen und ökotoxikologischen Eigenschaften (Hemmung der Hämoglobinsynthese, Nervenschädigung, wahrscheinlich kanzerogen, Anreicherung in der Nahrungskette) und zum zweiten die Bedingungen im Haupteinsatzgebiet ‚Starterbatterien für Autos‘. Hier konnte schon früh ein gut funktionierendes Rücknahme- und Recyclingsystem etabliert werden. Der in der Grafik ebenfalls wahrnehmbare neuerlicher Anstieg der Primärproduktion ab 1998 könnte auf die (noch) steigende Nachfrage nach Bildröhren mit vor Strahlen schützendem Bleiglas zurückzuführen sein, aber auch hier gewinnen Substitute (z. B. LCD-Bildschirme) rasant an Bedeutung. Möglicherweise stellt sich am Beispiel Blei – getriggert im Wesentlichen sowohl durch die regulativen Reaktionen auf seine (öko)toxikologischen Eigenschaften als auch durch Substitution bzw. Innovation – die zumindest denkbare Situation ein, dass der Bleivorrat in der globalen Technosphäre (also in Produkten und Schrotten) groß genug ist, um über ein effektives Recycling die ökonomische Nachfrage im Wesentlichen zu befriedigen. Dann müssten ‚nur noch‘ die selbstverständlich auch bei einer sehr gut entwickelten Kreislaufwirtschaft zu erwartenden ‚dissipativen Verluste‘ durch Neuproduktion von Blei aus Erzen ausgeglichen werden.

6.3 Metalle als ‚nicht-regenerative‘ Ressource

Die Stoffgruppe der Metalle eröffnet im Vergleich zu den meisten anderen nicht-regenerativen Ressourcen für ein nachhaltiges Wirtschaften wohl mit die besten Potenziale. Metalle ‚altern‘ nicht. Ermüdungserscheinungen sind metallurgisch reversibel. Metalle haben wie kaum eine andere Stoffgruppe sehr gute chemisch-physikalische Eigenschaften für ein Recycling auf gleichem Qualitätsniveau. Ein Problem stellt allerdings die Korrosion dar.

Verluste durch Korrosion müssen soweit wie möglich vermieden werden. Hochwertiges Recycling, Erhöhung der Ressourcenproduktivität und Vermeidung dissipativer Metallverluste stehen also im Zentrum von Strategien in Richtung auf eine nachhaltigere Metallwirtschaft¹⁰⁹.

Wir bezeichnen Metalle bzw. Erze als ‚nicht-regenerative‘ Ressourcen. Das mag erläuterungsbedürftig sein. Immerhin werden Erze in der Erdkruste permanent neu gebildet. Die Neubildung abbauwürdiger Erze in der Erdkruste und ihr ‚Transport‘ in die Nähe der Erdoberfläche geschehen in geologischen und nicht in historischen Zeiträumen¹¹⁰. Wenn die Ausbeutungsrate von (zugänglichen) Erzen um etliche Größenordnungen höher liegt, als deren Neubildungsrate, ist für eine sich in historischen Zeiträumen bewegende (letztendlich wirtschaftliche) Debatte über Ressourcen im Rahmen des Nachhaltigkeitsdiskurses das Adjektiv ‚nichtregenerierbar‘ ohne Zweifel adäquat.

Metalle lassen sich sehr gut recyceln. Auch dies wäre ein Ansatzpunkt für ‚Ressourcenregeneration‘. Schließlich gilt auch für Metalle der physikalische Grundsatz des ‚Erhalts der Materie‘. Metalle werden also ‚immer da‘ sein. Fraglich ist nur, ob sie auch für uns nutzbar sein werden. Wenn es um die Nutzbarkeit von Ressourcen geht und nicht nur um das Vorhandensein von chemischen Elementen (oder Energie), geht es um die Frage, in welcher ‚thermodynamischen Form‘ die Stoffe (bzw. die Energien) vorliegen.

Metalle können also nicht ‚vernichtet‘ aber sehr wohl ‚vernutzt‘ d. h. unter thermodynamischen Gesichtspunkten ‚entwertet‘ werden. Der springende Punkt bei dieser ‚Vernutzung‘ ist die Entropieproduktion mit dem Fokus auf Dissipation bzw. Mischungsentropie. Zwei Aspekte stehen damit einer immerwährenden Kreislaufführung von Metallen entgegen:

- Die **dissipativen Verluste** in die Umgebung (sowohl innerhalb der Technosphäre als auch in Ökosysteme hinein). Sie führen in der Regel dazu, dass die Metalle dort in niedrigerer Konzentration und/oder in metallurgisch-technisch problematischeren (Begleit)formen vorliegen¹¹¹, als in den natürlichen Erzen. Und sie können dort darüber hinaus in Organismen und Ökosystemen (öko-)toxikologisch sehr problematische Wirkungen entfalten.
- Die **Verunreinigung der großen Metallströme** in der Technosphäre durch andere Stoffe (meist ebenfalls Metalle), die aus diesen Metallströmen nicht bzw. nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand wieder entfernt werden können. Dies gilt insbesondere für Störstoffe und Legierungselemente (z. B. Anreicherung von Cu, Ni und Cr im Baustahl).

6.3.1 Erze und Metalle als ‚Erbe der Menschheit‘

Erze sind für uns Ressourcen und als solche Ergebnis einer kosmischen und geologischen Evolution. Wichtige Schritte waren dabei nach unserem heutigen Kenntnisstand die Evolution des Kosmos und in diesem Zusammenhang die Evolution der Elemente also z. B. die Bildung von Galaxien, Sternen und Planeten und insbesondere die Bildung der (schwereren) Metalle in kosmischen Prozessen, wie z. B. Supernova-Explosionen (Samland 2000). Sodann die Bildung des Planeten Erde mit seiner Erdkruste (Taylor; McLennan 1985, 1995).

Um für uns nutzbar zu sein, müssen die Metalle an bestimmten Stellen in der Erdkruste angereichert werden und auch in die für uns zugänglichen Bereiche gelangen. Hierfür spielen v. a. mit der Plattentektonik verbundene geophysikalische und geochemische

¹⁰⁹ Vgl. die Zielbestimmung einer ‚Nachhaltigen Metallwirtschaft‘ in Kapitel 3.4

¹¹⁰ Im Vergleich zu diesen geologischen Zeiträumen entspricht die gesamte bisherige Menschheitsgeschichte nur dem sprichwörtlichen ‚Wimpernschlag‘.

¹¹¹ Letzteres könnte man in Abgrenzung zu den rein dissipativen Verlusten als ‚chemische Verluste‘ bezeichnen

Prozesse in der Erdkruste, sowie Verwitterungsprozesse auf der Erdoberfläche eine zentrale Rolle (Taylor; McLennan 1985, 1995). Die Erze liegen als Folge dieser Prozesse in primären oder sekundären Lagerstätten vor, im letztgenannten Fall in Sedimenten oder in gelöster Form z. B. im Meerwasser (Bsp. Magnesiumgewinnung). Für die Nutzbarkeit von Erzen entscheidend ist aber nicht nur die Konzentration, sondern auch die chemische (Bindungs)Form, in der die Metalle in den Erzen vorliegen. Kupfer aus sulfidischen (primären) Erzen zu gewinnen, ist heute Stand der Technik. Der erste Kupferbergbau konzentrierte sich allerdings eher auf die unterirdischen hydro-thermalen Auslaugungs- bzw. oberirdischen Verwitterungsprodukte solcher primärer (meist sulfidischer) Erze. Oxidische Kupfererze aus sekundären Lagerstätten waren einfacher zu verarbeiten, zudem war in diesen sekundären Lagerstätten das Kupfer noch viel stärker angereichert. Schon in der Bronzezeit lernte man, Sulfiderze zu verarbeiten¹¹². Oxid-Silikaterze werden heute hydrometallurgisch verarbeitet.

Erzlagerstätten müssen – wie insgesamt die Ergebnisse der geologischen und biologischen Evolution auf der Erde – thermodynamisch als Systeme fern vom thermodynamischen Gleichgewicht betrachtet werden. Um diesen Zustand zu erreichen und aufrecht zu erhalten, sind thermodynamische Kräfte vonnöten. Im Falle der Erzbildung sind dies die atomaren Zerfallsprozesse im Erdinneren, die die Plattentektonik mit ihren Vorgängen der Krustenaufschmelzung und Krustenneubildung und den Vulkanismus antreiben sowie die für Verwitterungsprozesse und für biologische Aktivitäten verantwortliche Sonnenenergie. Die Sonne sorgt z. B. über den Wasserhaushalt für die Konzentration von Metallerzen in sekundären Lagerstätten¹¹³.

Erze sind also thermodynamisch gesehen besonderen Umständen geschuldete ‚Glücksfälle‘ und als solche für die Menschheit wertvoll¹¹⁴. Nicht ohne Grund zählen wir die Erze zu den ‚Bodenschätzen‘. Wie wichtig Bodenschätze sind, zeigt der traurige Umstand, dass um sie immer wieder Kriege geführt werden. Unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten, d. h. vor allem mit Blick auf die Gerechtigkeit zwischen den heute lebenden und den zukünftigen Generationen müssen Erze als Vorleistungen der Natur und als ‚Erbe der Menschheit‘ betrachtet werden. Mit diesem Erbe muss im Sinne der intergenerationellen Gerechtigkeit haushälterisch umgegangen werden. Dies gilt natürlich genauso – wenn nicht gar erst recht – für die schon produzierten Metalle. Selbstverständlich ist es unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ein Gewinn und kein Verlust, wenn wir zwar Erze ‚verbrauchen‘, den zukünftigen Generationen aber dafür Metalle vererben¹¹⁵.

Eine Voraussetzung für dieses Vererben ist allerdings die Minimierung dissipativer Verluste und auch beim Vererben der Metalle kommt es auf die Qualität an. Als – zumindest auf dem heutigen Stand der Technik - besonders problematische Form der Dissipation muss die Verunreinigung von Metallen angesehen werden, insbesondere durch andere Metalle, die nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand wieder entfernt werden können. Spätestens dann, wenn wir die von uns ‚verbrauchten‘ Metalle in einer verunreinigten Form weiter vererben, die problematischer ist, als die von zukünftigen Generationen absehbar nutzbaren Erze, müssen wir auch hier von einem absoluten dissipativen ‚Verlust‘ sprechen¹¹⁶. Dies gilt insbesondere für die Basismetalle Stahl/Eisen und Aluminium¹¹⁷.

¹¹² Vgl. Krüger 2004

¹¹³ Vgl. zu den grundlegenden Vorgängen der Lagerstättenbildung Petrascheck/Pohl 1992, S. 4 - 111

¹¹⁴ Mit der Erzbildung hat die Natur also in unserem Sinne sozusagen ‚vorgearbeitet‘. Und je mehr sie vorgearbeitet hat, also je höher die Konzentration und je nutzbarer die Form ist, in der die Erze vorliegen, um so geringer ist der Aufwand, den wir aufsetzend auf dieser ‚natürlichen Vorarbeit‘, bei der Metallgewinnung aufbringen müssen.

¹¹⁵ Die nachfolgenden Generationen werden das nur dann ggf. anders sehen, wenn sie über erheblich effizientere Methoden der Metallgewinnung verfügen, z. B. über erheblich höhere Ausbringungsraten (mit denen es sich ggf. für sie lohnt, unsere Abraumhalden noch einmal durchzuarbeiten) oder über ökologisch wesentlich verträglichere Methoden der Metallgewinnung.

¹¹⁶ Am meisten gefürchtet ist diesbezüglich die Kontamination großer Metallströme mit radioaktiven Elementen. Aber auch die starke Verunreinigung mit anderen Metallen (sog. Störstoffen bzw.

Der ökonomische Wert der Erze und Metalle als ‚Erbe der Menschheit‘ ist offenkundig. Er ist unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten aber kaum zu quantifizieren. Wir können zwar den ‚aktuellen (Markt)Wert‘ von Lagerstätten nach bestem Wissen und Gewissen abschätzen. Mit Nutzungsrechten an Lagerstätten wird ja auch gehandelt. Diese ‚Werte‘ sind aber stark von der aktuellen ökonomischen Situation, von Bedarfsprognosen und Substitutionsmöglichkeiten und der technischen Entwicklung abhängig. Man kann unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten auch noch einen Schritt weiter gehen. Wir finden zumindest Anhaltspunkte für den Wert der ‚Vorleistungen der Natur‘, wenn wir den Aufwand zugrunde legen, den wir heute und in absehbarer Zeit treiben müssen, um aus Erzen hochreine Metalle zu gewinnen. Wir können rein rechnerisch den heutigen und auch ggf. den absehbaren Aufwand für den Konzentrationsprozess von z. B. 8%igem Erz auf 99,99%iges Metall in Beziehung setzen zum natürlichen Anreicherungsfaktor, also zur Aufkonzentration vom ‚worst case‘ einer statistischen Gleichverteilung aller Elemente in der Erdkruste auf ein 8%iges Erz.

Grobe Abschätzungen der durchschnittlichen Elementgehalte der Erdkruste besagen, dass ohne die erdgeschichtlichen Anreicherungsprozesse z. B. der Gehalt an Kupfer in der Erdkruste ca. 0,005 % beträgt¹¹⁸. Im Durchschnitt werden derzeit Kupfererze mit einem Kupfergehalt von 1,3% abgebaut. Als Untergrenze der Abbauwürdigkeit gelten derzeit 0,4%¹¹⁹. Am Beispiel Kupfer liegt also zwischen dem durchschnittlichen Gehalt der Erdkruste und der Mindestabbaufähigkeit ein Anreicherungsfaktor von ca. 80. Diese ‚natürliche Vorarbeit‘ könnte nun in einem zweiten Schritt – mit Bezug auf den darauf folgenden Aufwand der technischen Metallgewinnung - als Aufwand in Stoff-, Energie- und Geldeinheiten ausgedrückt werden. Zumindest könnte man auf diese Weise den steigenden Aufwand, den wir haben, wenn wir immer ärmere Erze abbauen, zu dieser ‚Vorleistung‘ ins Verhältnis setzen.

Die Anreicherungs faktoren einiger beispielhafter Metalle sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2_ Anreicherungs faktoren derzeit durchschnittlich abgebauter Erze¹²⁰

Metall	Stelle in der Häufigkeit von Elementen in der Erdkruste	Durchschnittlicher Gehalt in der Erdkruste	Derzeitiger Mindestgehalt eines abbauwürdigen Erzes	Anreicherungs faktor
Aluminium	3.	8 %	25 %	3
Eisen	4.	6 %	50 %	10
Kupfer	24.	0,005 %	0,4 %	80
Gold	72.	0,005 g/t	1 g/t	500

tramp elements) kann dazu führen, dass derart verunreinigte Schrotte besser ‚entsorgt‘ werden, anstatt mit ihnen noch weitere und größere Metallströme zu verunreinigen.

¹¹⁷ Wobei man beim Aluminium noch am ehesten davon ausgehen kann, dass zu gegebener Zeit entsprechende Raffinationsverfahren (z. B. selektive Kristallisation) angewendet werden können (Mitteilung Krüger 2004).

¹¹⁸ Vgl. Petrascheck/Pohl 1992, S. 1, Craig et al. 1996, 2001. Grundlage für derartige Bestimmungen der Häufigkeit eines Metalls in der Erdkruste sind Hochrechnungen aus der Verteilung der häufigsten Gesteine mit ihren durchschnittlichen Metallgehalten.

¹¹⁹ Vgl. Evans 1997, S. 25

¹²⁰ Daten nach Petrascheck/Pohl 1992, S. 1 bzw. Craig et al. 1996, 2001, z. T. mit aktualisierten Mindestgehalten abbauwürdiger Erze. Wichtig ist hier noch einmal der Hinweis, dass die Abbauwürdigkeit von Erzen bei weitem nicht allein durch den Metallgehalt bestimmt wird. Ggf. viel wichtigere Aspekte der Abbauwürdigkeit sind z. B. die qualitativen (Bindungs)Formen, in denen die Metalle im Erz vorliegen, die Begleitminerale, die Zugänglichkeit der Lagerstätte usw.

Derartige ‚Abschätzungen‘ und erst recht die im zweiten Schritt fälligen Extrapolationen in die Zukunft hinsichtlich technischer Entwicklungen, Extraktionsaufwand und Ausbringungsraten sind selbstverständlich mit extremen Unsicherheiten behaftet. Trotzdem sollten derartige Ansätze zur ‚Ökonomisierung‘ des ‚Erbes der Menschheit‘ weiter verfolgt werden, ihnen dürfte in der Nachhaltigkeitsdebatte eine wichtiger werdende Rolle zukommen. Die Integration des Faktors ‚Natur‘ (zumindest in der Form von Ressourcen) als Basis allen Wirtschaftens in das wirtschaftliche Denken, die Integration der viel zu lange als ‚umsonst und unbegrenzt verfügbar‘ betrachteten ‚freien Güter‘ in ökonomische Berechnungen, also die Bestimmung und Erhaltung des ‚Naturkapitals‘ prägen ja nicht zufällig einen Großteil des ökonomischen Strangs im Nachhaltigkeitsdiskurs.

Die Bestimmung des ‚Wertes der Erze‘ als Erbe der Menschheit im Sinne des vermiedenen ‚ökonomischen und technischen Aufwands‘ wäre zudem nur ein erster Schritt. Zusätzlich zur Bestimmung des ökonomisch-technischen Aufwandes für die Gewinnung von Metallen aus Erzen müssten dann auch die (zumindest bisher damit verbundenen) Neben- und Folgewirkungen in den sozialen und ökologischen Nachhaltigkeitsdimensionen mit berücksichtigt werden¹²¹. Auch die sozial-ökologischen Folgen der Metallwirtschaft sind Teil ihres ‚Erbes‘. Neben dem positiven Erbe der erwirtschafteten Werte (den Vorrat an Metallen in der Technosphäre eingeschlossen) geben wir ja auch die negativen Seiten dieses Erbes weiter, insbesondere die Emissionen und Abfälle, einschließlich irreversibler Anreicherungen von Metallkontaminationen in Ökosystemen sowie ggf. ebenso irreversible Zerstörungen von Biotopen beim Erzabbau, verbunden z. B. mit einer Verringerung der Biodiversität.

Wenn der skizzierte Ansatz zur Bestimmung des Werts des ‚Naturkapitals‘ im Hinblick auf die Bewertung von Erzlagerstätten weiter präzisiert und operationalisiert wird, bekommen wir auch ein Instrumentarium an die Hand, mit dem sich bewerten ließe, was es ökonomisch (unter Einbeziehung derzeit externalisierter Kosten) bedeutet, wenn wir in Zukunft gezwungen sind, immer ‚ärmere‘ Erze mit immer geringeren (bzw. in problematischeren Formen vorliegenden) Metallkonzentrationen abzubauen.

6.3.2 Zur Reichweite von Reserven und Ressourcen

In einem endlichen System ist die Nutzbarkeit nichtregenerierbarer Ressourcen absolut begrenzt. Das leuchtet unmittelbar ein. Kaum beginnen wir aber darüber zu diskutieren, wie lange denn diese oder jene Ressource noch ‚reichen‘ wird, nehmen die Missverständnisse überhand. Missverständnisse, die auf der unklaren Verwendung von wissenschaftlich klar definierten Begrifflichkeiten beruhen, lassen sich bis zu einem gewissen Punkt ausräumen, z. B. durch die Erläuterung von Begriffen wie ‚Statische Reichweite‘ oder durch die klare Unterscheidung zwischen den Begriffen Reserven (incl. Reservebasis) und Ressourcen sowie durch die Unterscheidung zwischen verschiedenen Formen und Qualitäten von Recycling. Eine weitere Quelle von Missverständnissen ist aber nicht so leicht auszuräumen. Dabei geht es um die Einschätzung bzw. Bewertung der Reichweite unseres Wissens bzw. unserer Wissensmöglichkeiten. Das beginnt schon mit dem Wissen über heute schon vorhandene Gegebenheiten, wie z. B. das Vorhandensein von Lagerstätten. Viel problematischer sind aber Extrapolationen in die Zukunft, Annahmen über Nachfrageentwicklungen, über Substitutionsmöglichkeiten und/oder über erreichbare Steigerungen der Ressourcenproduktivität. Wir wissen nicht, welche Erzkörper in welchen Konzentrationen und Formen in den (derzeit und zukünftig) zugänglichen Bereichen der Erdkruste tatsächlich vorhanden sind. Aufgrund der prinzipiellen Offenheit der Zukunft sind zudem nur Wahrscheinlichkeitsaussagen darüber möglich, wie sich die Nachfrage nach Erzen entwickeln wird. Letztere wird z. B. stark bestimmt von der (welt)wirtschaftlichen Entwicklung, von der Recyclingrate, von der technischen Entwicklung und in diesem Zusammenhang insbesondere auch von etwaigen Substitutionsmöglichkeiten. Wir wissen nicht ob wir Metalle, bzw. welche Metalle wir in Zukunft noch brauchen werden. Die Reserven bzw. Ressourcen an Flintsteinen, einem der wichtigsten Werkstoffe der Steinzeit,

¹²¹ Die könnte z. B. mit Hilfe von um externe Kosten erweiterten Kosten-Nutzen-Analysen geschehen sowie mit Hilfe von Ökobilanzen, toxikologischen Analysen und Risikoanalysen.

interessieren schließlich heute niemanden mehr. Wird und kann es den (bzw. einigen) Metallen ähnlich ergehen? Wird sich durch Innovation das Problem der Endlichkeit der Metallressourcen von selbst erledigen? Wir können es nicht wissen. Wir können aber auch nicht schlicht auf rechtzeitig verfügbare Innovationen und Substitutionen vertrauen. Das wäre eine hochriskante ‚Strategie‘, vergleichbar mit dem Flug in neue Zielgebiete, in der Hoffnung, dass die Menschen dort schon rechtzeitig mit dem Bau von Landebahnen fertig werden. Die Substitution der (einiger) Metalle wäre ohne Zweifel eine Lösung des Problems der Endlichkeit der Ressourcenverfügbarkeit. Die Entwicklung von Substituten wird durch Knappheitssignale, die sich irgendwann ja auch in Preissteigerungen ausdrücken müssen, erst richtig intensiviert. Doch auch ein solches ‚Ende der Metallwirtschaft‘ kann ohne Zweifel nicht nur als ‚rosige Zukunft‘ ausgemalt werden. Die ‚schöpferische Zerstörung‘, die - wie schon Schumpeter postulierte - mit jeder Innovation immer auch verbunden ist, würde hier ganze Wirtschaftsbranchen und etliche Nationen ziemlich hart treffen.

Derzeit jedenfalls deutet wenig darauf hin, dass zukünftige Innovationen zur weit reichenden Substitution von Metallen führen werden. Eher wahrscheinlich sind Verschiebungen der Nachfrage innerhalb der Metalle, insbesondere auch hin zu sehr seltenen Metallen als Basis für Funktionswerkstoffe bzw. als Legierungsbestandteile. Diese Diversifizierung und Spezialisierung könnte durchaus verbunden sein mit einer Erhöhung der Metallumsätze insgesamt. Ein möglicher Grund dafür könnte darin liegen, dass die Gewinnung einiger sehr seltener Metalle derzeit noch (als Nebenprodukte) an die wesentlich größeren Ströme der Kupfer-, Nickel- oder Aluminiumerzeugung gebunden ist.

Spätestens seit dem Bericht des Club of Rome über die Grenzen des Wachstums sind Angaben über statische Reichweiten nicht regenerierbarer Ressourcen in der allgemeinen Öffentlichkeit bekannt geworden. Die Endlichkeit dieser Ressourcen leuchtet wie erwähnt unmittelbar ein. Spätestens wenn dann aber die Reichweite einiger globaler Ressourcen wie z. B. des Erdöls, seit über 30 Jahren ca. 30 Jahre betragen soll, werden die meisten Menschen stutzig. Statische Reichweiten werden (zugegebenermaßen ziemlich schlicht) errechnet aus den bekannten Reserven geteilt durch die derzeitige globale Jahresproduktion. Statische Reichweiten sind eben ‚statische‘ Aussagen (Momentaufnahmen) inmitten einer äußerst dynamischen Situation. Als Reserven werden diejenigen Lagerstätten bezeichnet, die heute schon bekannt sind, und die mit den heutigen Technologien wirtschaftlich ausgebeutet werden können. Damit ist klar, dass Aussagen über Reserven von mindestens drei unabhängigen Variablen abhängig sind:

1. vom aktuellen *Wissen über (bzw. der Intensität der Suche nach) Lagerstätten*, deren Typus (Bindungsform, Begleitelemente), deren Verteilung und Größe sowie den jeweiligen Erzkonzentrationen,
2. vom aktuellen *Stand der Technik*, der Effektivität und Effizienz der Erz- und Metallgewinnung (z. B. Verhältnis Erz zu Abraum und Begleitstoffen, Ausbringungsrate, Arbeitsproduktivität, Material- und Energieeffizienz) und
3. von der aktuellen *Kosten- und Erlössituation*, also von der Kapitalrendite (die wiederum abhängig ist z. B. vom aktuellen Dollarkurs, Zinsniveau und den Steuersätzen), den Betriebskosten (die wiederum abhängig sind z. B. vom Lohnniveau, den Energie- und Materialkosten und den Standards des Arbeits- und Umweltschutzes) sowie von den Metallpreisen.

Aktuelle ‚statische Reichweiten‘ einiger Metalle sind in der Abbildung 13 dargestellt.

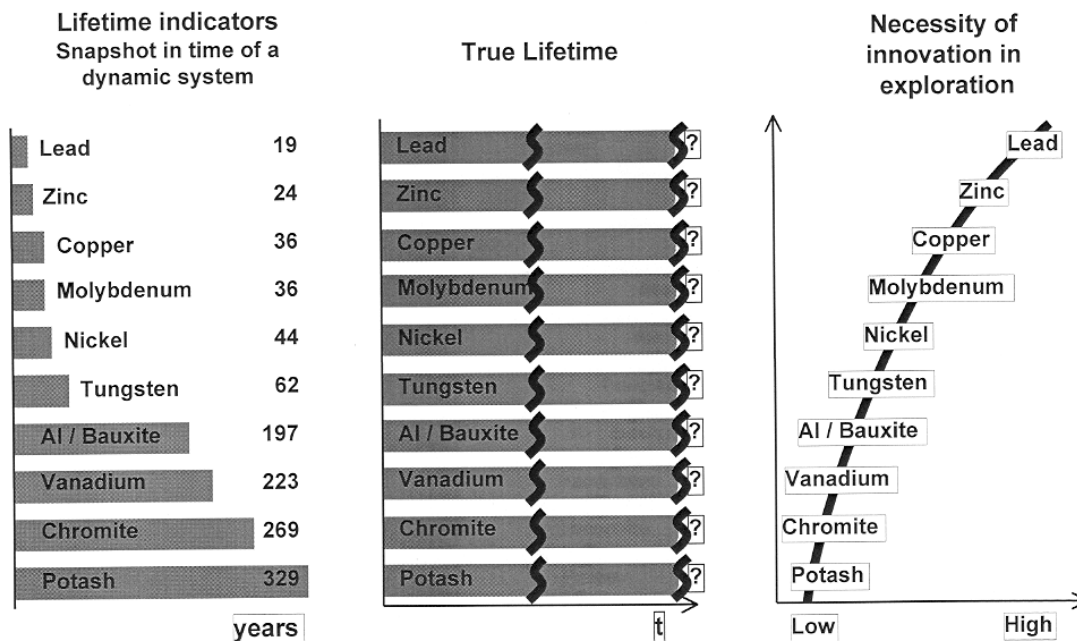


Abbildung 13_ Statische Reichweiten und geschätzte Explorationsnotwendigkeiten bei einigen mineralischen Rohstoffen (Aus: Wellmer, Wagner 2004)

In dieser Grafik wird in aller Deutlichkeit darauf hingewiesen, dass wir über die ‚wirkliche‘ Reichweite von Ressourcen wenig wissen. Aus Vergleichen zwischen den statischen Reichweiten verschiedener Metalle kann aber zumindest die Notwendigkeit abgeleitet werden, auf diese Momentaufnahme zu reagieren, z. B. durch Innovationen und nicht zuletzt auch durch Exploration zusätzlicher Lagerstätten.

In der Debatte über Reichweiten sollten zumindest drei Begriffe definitionsgemäß verwendet werden: Ressourcen, Reservebasis und Reserven. Allen drei Begriffen ist gemeinsam, dass ein gewisses ‚geologisches‘ Wissen über das tatsächliche Vorhandensein von Lagerstätten vorausgesetzt wird, allerdings mit von Ressourcen über Reservebasis zu Reserven zunehmenden Anforderungen an die Gewissheit. Genauso nehmen von Ressourcen zu Reserven die Anforderungen an die Nähe zur Wirtschaftlichkeit des Abbaues zu, sozusagen von ‚erwartbar möglich‘ über ‚demnächst möglich‘ bis hin zu ‚mit derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich‘. Ressourcen werden somit definiert als „a concentration of naturally occurring solid, liquid, or gaseous material in or on the Earth‘ crust in such a form and amount that economic extraction of a commodity from the concentration is currently or potentially feasible“¹²². Reserven sind derjenige „Teil der Gesamtressourcen, der mit großer

¹²² USGS 2001, S. 191 Weitere Differenzierungen bieten das Institute of Materials, Minerals and Mining 2002 <http://www.imm.org.uk/immres.htm>: A mineral resource is a tonnage or volume of rock or mineralization or other material of intrinsic economic interest the grades, limits and other appropriate characteristics of which are known with a specified degree of knowledge. A measured mineral resource is that portion of a mineral resource for which tonnage or volume is calculated from dimensions revealed in outcrops, pits, trenches, drill-holes or mine workings, supported where appropriate by other exploration techniques. The sites used for inspection, sampling and measurement are so spaced that the geological character, continuity, grades and nature of the material are so well defined that the physical character, size, shape, quality and mineral content are established with a high degree of certainty. An indicated mineral resource is that portion of a mineral resource for which quantity and quality are estimated with a lower degree of certainty than for a measured mineral resource. The sites used for inspection, sampling and measurement are too widely or inappropriately spaced to enable the material or its continuity to be defined or its grade throughout to be established

Genauigkeit erfasst wurde und mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden kann¹²³, und mit dem Begriff der ‚Reservebasis‘ werden neben den sicheren Reserven noch zusätzlich die wahrscheinlichen Reserven erfasst, die zwar geologisch nachgewiesen sind, derzeit aber noch im subökonomischen Bereich liegen. Ihre Förderwürdigkeit wird in naher Zukunft erwartet.

Für Kupfer und Aluminium werden in Tabelle 3 beispielhaft einige Zahlen zu Reserven, Reservebasis und zu Ressourcen dargestellt.

Tabelle 3 Globale Reserven, Reservebasis und Ressourcen für Aluminium und Kupfer¹²⁴

	Reserven	Reservebasis	Ressourcen
Aluminium in Bauxit	23-25 Mrd. Tonnen	27-35 Mrd. Tonnen	40-75 Mrd. Tonnen
Kupfer in Kupfererzen	308-340 Mio. Tonnen	590-650 Mio. Tonnen	2-2,3 Mrd. Tonnen

Im Nachhaltigkeitsdiskurs wird über Zeiträume in der Zukunft diskutiert, die diejenigen der klassischen Ressourcenökonomie deutlich übersteigen. Insofern müssen auch weiter reichende Fragen gestellt (und möglichst beantwortet) werden. Was ein Erz ist, ist zwar jeweils abhängig von den (erwartbaren) ökonomischen Rahmenbedingungen aber eben nicht nur davon. Aussagen über Erze enthalten immer eine ökonomische, sie enthalten aber auch immer eine geologische bzw. mineralogische Komponente. Dem Geologen oder Mineralogen ist es auch ohne ökonomische Kalkulationen deutlich, dass er ein Gestein mit deutlich höheren Metallkonzentrationen (also ein potentielles Erz) vor sich hat. Es ist also durchaus möglich, die Frage zu stellen: Wo stehen wir heute mit Blick auf den Abbau einer globalen Gesamtmenge bestimmter Gesteine mit Mindestmetallkonzentrationen? Damit stellt sich natürlich die Frage, wo wollen wir die Grenze legen? Die statistische Normalverteilung eines Metalls in der Erdkruste (seine durchschnittliche Häufigkeit) ist sozusagen der Ausgangspunkt (das Hintergrundrauschen). Welchen Mindest-Anreicherungsfaktor wollen wir dann für ein ‚potentielles Erz‘ also für die ‚deutlich höhere Metallkonzentration‘ zugrunde legen? Mindestens zwei Fragenkomplexe müssen somit im Hinblick auf die Verfügbarkeit von metallischen Ressourcen für den Nachhaltigkeitsdiskurs intensiver untersucht werden:

1. Wenn wir als ‚potentielle Erze‘ diejenigen Metallkonzentrationen in Gesteinen bezeichnen, die dem x-fachen der globalen durchschnittlichen Konzentration bestimmter Metalle in der Erdkruste entsprechen¹²⁵, wie groß ist dann die Gesamtmenge an verfügbarem Erz? Und welchen Anteil am Gesamtmetallgehalt dieser Erze (an diesem ‚natural stock‘) haben wir bis heute schon gefördert?

¹²³ Vgl. BMWi 1999, S. 30 “A mineral reserve is that portion of a mineral resource on which technical and economic studies have been carried out to demonstrate that it can justify extraction at the time of the determination and under specified economic conditions. A proved mineral reserve is that portion of a measured mineral resource as defined on which detailed technical and economic studies have been carried out to demonstrate that it can justify extraction at the time of the determination and under specified economic conditions. A probable mineral reserve is that portion of a measured and/or indicated resource as defined on which sufficient studies have been carried out to demonstrate that it can justify extraction at the time of the determination and under specified economic conditions. Institute of Materials, Minerals and Mining 2002
<http://www.imm.org.uk/immres.htm>

¹²⁴ USGS 2001; BGR 1995; Craig 1996, 2001

¹²⁵ Der Faktor kann vor dem Hintergrund der jeweils bisher vorfindbaren natürlichen Anreicherungsfaktoren (vgl. Tabelle 2) nur metallspezifisch bestimmt werden.

2. Wie stellt sich die Verteilung der Metallkonzentrationen innerhalb dieser Gesamtmenge von Erzen dar? Sind wir schon längst gezwungen, immer weiter abnehmende Erzkonzentrationen abzubauen? Steigt der technische, ökonomische und ökologische Aufwand zur Gewinnung von Metallen linear mit abnehmendem Erzgehalt, oder lässt sich ein Konzentrationsbereich identifizieren, ab welchem dieser Aufwand nach heutiger Kenntnis unverhältnismäßig steigen wird?

Diese Fragen werden bisher kaum diskutiert. Immerhin gibt es – sozusagen als Hintergrundinformation zur Frage 2 – zumindest schon veröffentlichte Schätzungen über die Häufigkeit bestimmter Metalle in der Erdkruste. Diese Angaben beruhen auf wohl recht groben Hochrechnungen, bei denen die ungefähre Verteilung der Massengesteinsarten in der Erdkruste mit ihren jeweiligen durchschnittlichen Gehalten an Elementen zugrunde gelegt wird¹²⁶. Wie sich die Konzentrationen verschiedener Metalle dann aber konkret in der (oberflächennahen) Erdkruste verteilen, ist weitgehend unbekannt. Kürzlich hat sich immerhin Ayres im Rückgriff auf Skinner mit einer Schätzung über die mögliche Verteilung des geochemisch vergleichsweise seltenen Metalls Kupfer in der Erdkruste vorgewagt (vgl. Abbildung 14). Und er hat auch gleich eine Bestimmung der ungefähren derzeitigen global durchschnittlichen Position beim Abbau von Kupfererzen versucht.

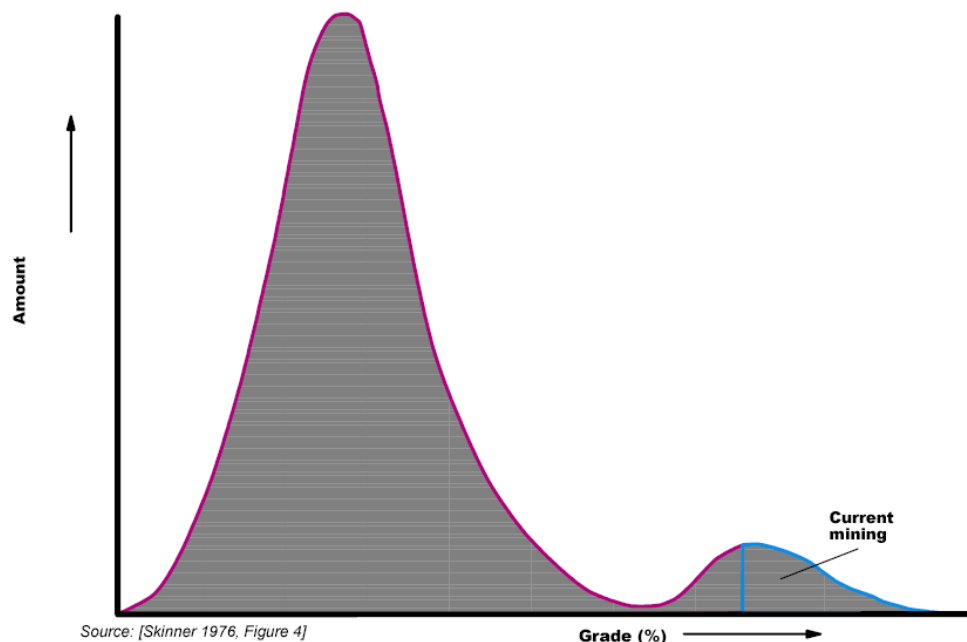


Abbildung 14_ Wahrscheinliche Verteilung eines geochemisch seltenen Metalls in der Erdkruste
(Aus: Ayres et al 2002)

Eine derartige Verteilung, dargestellt in zwei mehr oder minder gaußähnlichen Verteilungskurven, der zufolge die große Masse der Metalle (über 90%) eher in geringen Konzentrationen vorliegt, könnte der Wirklichkeit durchaus nahe kommen. Ob wir allerdings - nehmen wir das viel diskutierte Beispiel Kupfer - tatsächlich schon den Zenit der ersten Verteilungskurve überschritten haben, ist derzeit noch heftig umstritten. Wellmer weist z. B. mit Recht darauf hin, dass Aussagen über flächig verteilte Ölvorräte, die noch am ehesten mit Probebohrungen getroffen werden können, leichter zu erlangen und damit ‚sicherer‘ sind, als Aussagen über stärker vertikal ausgedehnte Erzkörper¹²⁷. Er wehrt sich auch zu Recht

¹²⁶ Vgl. Taylor; McLennan 1985, 1996, Skinner 1986, Craig et al 1996, Craig et al 2001

¹²⁷ Diskussionsbeitrag anlässlich der Ringvorlesung ‚Nachhaltige Metallwirtschaft.‘

gegen die vordergründige ‚Überzeugungskraft‘ von Hinweisen darauf, dass zwischen 1940 und 1990 der durchschnittliche Kupfergehalt der geförderten Erze ‚dramatisch‘ von ca. 4% auf um die 1,3 % gesunken sei. Auch diese Entwicklung kann viele Ursachen haben. Zudem scheint sich der durchschnittliche Kupfergehalt der Erze zwischen 1980 und 2000 eher zu stabilisieren, bzw. sogar wieder leicht anzusteigen.¹²⁸

So ist z. B. die Entscheidung von Schürfrechtsinhabern bzw. Minenbetreibern, welche Erze in welcher Form als nächstes abgebaut werden, nicht allein und vermutlich sogar nicht einmal vornehmlich durch den ‚Sachzwang‘ der verfügbaren Erze bestimmt. Gerade in den vergangenen Jahrzehnten konnten durch den Übergang zum großflächigen Tagebau mit dem dort einsetzbaren schweren Gerät ‚economies of scale‘ realisiert werden, die es ggf. wirtschaftlicher erscheinen lassen, niedrigere Erzkonzentrationen im ‚großen Stil‘, als z. B. höhere Erzkonzentrationen in Nischenbereichen abzubauen.

Innovationen und Veränderungen auf den Märkten sowie bei den Rahmenbedingungen des Wirtschaftens bestimmen die Investitionsentscheidungen in der gesamten Metallkette viel weitgehender, als die gegenwärtig verfügbaren Erzkonzentrationen¹²⁹. Jeder einzelne Schritt in der Metallkette, angefangen von der Erzaufbereitung über die Metallherstellung, die Metallbe- und -verarbeitung, die Produktnutzung bzw. Dienstleistung incl. Wartung, Reparatur und ggf. Modernisierung bis hin zur Demontage und zum Recycling befindet sich in einem Innovationsprozess, in dem immer neue Lösungen mit Blick auf die ökonomischen, sozialen und ökologischen Nachhaltigkeitsziele gefunden werden.

6.4 Metallrecycling als ‚Lösung‘?

Auch wenn also die Verfügbarkeit metallischer Ressourcen endlich ist, und wenn damit kein vergleichbar nachhaltiges Wirtschaften erreichbar ist, wie das zumindest im Prinzip auf der Basis von Sonnenenergie und Biomasse möglich wäre, so lässt sich doch ein wesentlich nachhaltigerer Umgang mit Metallen erreichen, durch Erhöhung der Ressourcenproduktivität und Streckung des Ressourcenverbrauch. Das Metallrecycling bietet hierfür sehr gute Voraussetzungen. Das Metallrecycling ist so alt wie die Metallproduktion. Es war immer einfacher, Altmetall zu verwenden, als neues Metall mühselig aus dem Erz zu gewinnen. Schon aufgrund ihres hohen Wertes wurden Metalle wiederverwertet, wo immer dies möglich war. Metalle bieten aber auch im Vergleich zu anderen Werkstoffen aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften hervorragende Voraussetzungen für ein hochwertiges Recycling. Wenn Korrosion vermieden wird, sind Metalle sehr lange haltbar und ermöglichen einen dauerhaften Einsatz der Produkte, die aus ihnen hergestellt werden. Sie unterliegen in der Gebrauchsphase keinen Alterungsprozessen oder sonstigen irreversiblen Qualitätsverlusten¹³⁰, und sie sind hervorragend umformbar, nicht zuletzt durch Wiedereinschmelzen.

Hochwertiges Metallrecycling bietet sich somit als Lösung für eine ganze Reihe von Nachhaltigkeitsproblemen an, nicht nur im Hinblick auf die Ressourcenverfügbarkeit, sondern auch mit Blick auf all die ökologischen und sozio-ökonomischen Probleme, die untrennbar mit der primären Metallproduktion verbunden sind. Recycling scheint der ‚Königsweg‘ einer Nachhaltigen Metallwirtschaft zu sein. Allerdings hat auch das Metallrecycling mit spezifischen Problemen zu kämpfen.

¹²⁸ Vgl. Wellmer, Wagner 2004

¹²⁹ Damit soll nicht behauptet werden, dass von der Verfügbarkeit von Ressourcen keinerlei Impulse für die Metallwirtschaft ausgehen. In Frage steht allerdings, ob sich ein solches Signal heute schon direkt aus den abnehmenden Konzentrationen der in den vergangenen Jahrzehnten abgebauten Erze ablesen lässt.

¹³⁰ Die Folgen der bekannten ‚Ermüdungsprozesse‘ sind im Zuge einer neuerlichen metallurgischen Behandlung reversibel.

Zu den wichtigsten dieser Probleme gehören:

- Die ‚Effektivität‘ des Recycling, also die Vermeidung dissipativer Verluste bzw. die Gewährleistung eines möglichst hohen Rückflusses von Schrott und metallhaltigen Abfällen
- Die ‚Effizienz‘ des Recyclings unter Nachhaltigkeitsaspekten, also das Verhältnis von technischem, ökologischem und ökonomischem Recyclingaufwand zum Recyclingertrag
- Die ‚Wertigkeit‘ des Recyclings, also die ‚Qualität‘ der Schrotte und insbesondere der durch das Recycling erzielbaren Metallqualitäten¹³¹.

Als besonders relevante Faktoren und Probleme für das Erreichen der Ziele einer hohen Recyclingeffektivität und –effizienz sowie einer hohen Wertigkeit der recycelten Metalle können angeführt werden:

- Die Preise für Neuware (virgin materials) und für verschiedene Schrottqualitäten
- Die Tatsache, dass viele Metalle meist nicht in reiner Form, sondern in Legierungen eingesetzt werden und somit die Notwendigkeit der Sicherung der Sortenreinheit der Schrotte
- Die ‚Verunreinigung‘ von Metallströmen, durch Störelemente, die nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand wieder aus den Metallschmelzen entfernt werden können
- Die Tatsache, dass die Verwendung von Legierungen, Werkstoffmixturen und von Verbundwerkstoffen ebenso zunimmt wie der Integrationsgrad dieser Mixturen in Produkten. Was besonders anschaulich wird bei der – ansonsten unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ja durchaus begrüßenswerten - Miniaturisierung im Elektronikbereich.

Das Recycling ist ein wichtiges Argument ‚pro Metalle‘ im Nachhaltigkeitsdiskurs. Im Vergleich zu anderen Werkstoffen sind die Metalle mit Blick sowohl auf Recyclingqualitäten als auch auf Recyclingmengen geradezu vorbildlich. Allenfalls noch bei Glas- und bei Papier sind vergleichbare Recyclingerfolge zu verzeichnen. In der Sekundärmetallwirtschaft scheint somit auf den ersten Blick alles mehr oder minder in Ordnung zu sein. Zumindest bei den großen Metallstoffströmen, bei Eisen/Stahl, Aluminium und Kupfer scheint das Recycling gut zu funktionieren. Allerdings sind auch die negativen gesundheitlichen und ökologischen Begleit- und Folgeerscheinungen des Recyclings in seiner heutigen Form nicht zu übersehen. In vielen Bereichen scheinen die problematischen Neben- und Folgeeffekte des Metallrecyclings in ihrem Zusammenwirken durchaus an diejenigen der Primärproduktion heran zu reichen. Dafür gibt es im Wesentlichen zwei Gründe. Zum einen ist die Recyclingwirtschaft wirtschaftlich eher kleinteilig, was u. a. dazu führt, dass meist auf der Basis vergleichsweise einfacher Technologien gearbeitet wird, und dass noch oft ein Vollzugsdefizit besteht mit Blick auf die Arbeits- und Umweltschutzgesetzgebung. Zum anderen hat die Recyclingwirtschaft mit einer Vielzahl von Legierungsbestandteilen, Anhaftungen und Verunreinigungen zu kämpfen. Abhängig von der Schrottqualität können so ziemlich alle Elemente quer durch das ganze Periodensystem in die Recyclingkreisläufe eingeschleppt werden aber auch hochproblematische organische Stoffe wie z. B. Dioxine, Furane und deren Vorläufer, also eine Stoffpalette, mit der die primäre Metallproduktion in dieser Form normalerweise nicht in Berührung kommt. Tabelle 4 zeigt eine Auswahl aus den anorganischen Emissionen einer Sekundärstahlhütte (vgl. Tabelle 4).

¹³¹ Keine Qualitätsverluste gibt es bei Metallen, die ohnehin einer weitreichenden ‚Raffination‘ unterzogen werden, also bei Edelmetallen, Kupfer, Zink und Blei.

Tabelle 4 Chemical compositions of EAF dusts

Chemical composition of EAF dusts from the production of carbon steel/low alloyed steel and high alloyed steel – based on [IPPC I&S BREF 2001; EUROFER EAF 1997; Hoffmann, 1997; Strohmeier, 1996]					
	Dust from carbon/low alloyed steel production [weight-%]			Dust from high alloyed/ stainless steel production [weight-%]	
Fe _{tot}	25	–	50	30	40
SiO ₂	1.5	–	5	7	– 10
CaO	4	–	15	5	– 17
Al ₂ O ₃	0.3	–	0.7	1	– 4
MgO	1	–	5	2	– 5
P ₂ O ₅	0.2	–	0.6	0.01	– 0.1
MnO	2.5	–	5.5	3	– 6
Cr ₂ O ₃	0.2	–	1	10	– 20
Na ₂ O	1.5	–	1.9	n/a	
K ₂ O	1.2	–	1.5	n/a	
Zn	10	–	35	2	– 10
Pb	0.8	–	6	0.5	– 2
Cd	0.02	–	0.1	0.01	– 0.08
Cu	0.15	–	0.4	0.01	– 0.3
Ni	0.02	–	0.04	2	– 4
V	0.02	–	0.05	0.1	– 0.3
Co	0.001	–	0.002	n/a	
As	0.003	–	0.08	n/a	
Hg	0.0001	–	0.001	n/a	
Cl	1.5	–	4	n/a	
F	0.02	–	0.9	0.01	– 0.05
S	0.5	–	1	0.1	– 0.3
C	0.5	–	2	0.5	– 1

Trotzdem ist das Metallrecycling eine Erfolgsgeschichte. Der Anteil von Sekundärmaterial an den jeweiligen Produktionsmengen ist bei den großen Metallströmen schon vergleichsweise hoch und steigt meist noch weiter. Der Schrottanteil an der Weltstahlproduktion liegt bei über 45% (BDSV 2003). 37 % der Aluminiumproduktion in Deutschland im Jahre 1997 und ca. 51% der deutschen Kupferproduktion im Jahre 1998 basierten auf Sekundärmaterial¹³². In den USA hat sich der Anteil der Sekundärmetalle an der gesamten Metallproduktion zwischen 1962 und 1991 von 28% auf knapp 53 % beinahe verdoppelt (Rogich 1993). Abbildung 15 zeigt die Entwicklung des Verhältnisses von Sekundär- zu Primärproduktion bei Zink, Kupfer, Aluminium, Stahl und Blei in den USA von 1900 bis 1991.

¹³² Vgl. Rombach 2004

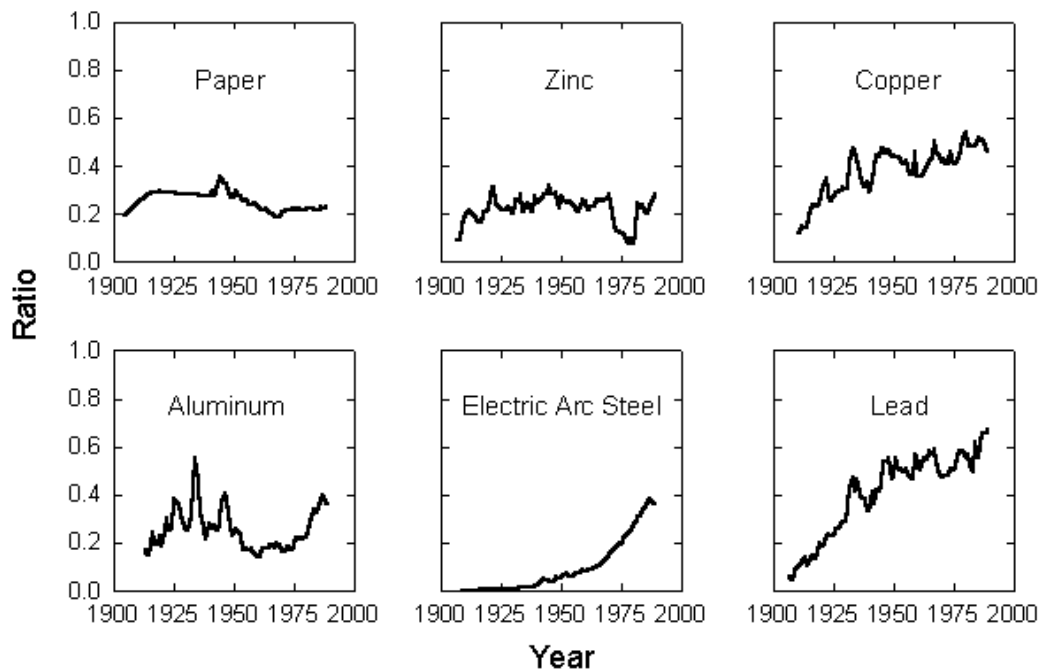


Abbildung 15_Verhältnis der Produktion aus Sekundär- zu Primärmaterial bei Papier, Zink, Kupfer, Aluminium, Stahl und Blei in den USA im 20. Jh.¹³³
 (Aus: Wernick et al 1996)

Doch mit Blick auf das Ziel einer ‚Nachhaltigen Metallwirtschaft‘ bleibt eine ganze Reihe von Fragen offen. Während der Anteil an Recyclingmaterial bei Stahl, Kupfer und Blei - trotz deutlicher Schwankungen bei Kupfer und Blei - noch einer vergleichsweise einheitlichen ansteigenden Tendenz folgt, sind die Entwicklungen bei Zink und Aluminium nicht so ohne weiteres verständlich. Hier spielen sicher die jeweiligen Preise für Primär- und Sekundärmaterial eine wichtige Rolle. Für die Beantwortung der unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten relevanten Frage, in wie weit der Bedarf an Metallen derzeit und in Zukunft über das Recycling gedeckt werden kann, sagen diese Daten leider wenig aus.

Wenn der Anteil des Schrotteinsatzes an der Produktion von Metallen als Recyclingquote bezeichnet wird, dann käme ein Land, das nur Sekundärmaterialhütten betreibt, auf eine 100%ige Recyclingquote, obwohl ggf. die nationale Metallwirtschaft im Wesentlichen durch Importe gespeist wird. Und selbst wenn alle Importe und Exporte einbezogen würden, ergäbe sich noch kein realistisches Bild. Wirkliche ‚effektive‘ Recyclingquoten sollten sich sinnvollerweise auf denjenigen Anteil eines zum Zeitpunkt x produzierten Materials beziehen, der bis zum Zeitpunkt y wieder in die Sekundärmetallherstellung zurück fließt¹³⁴. Für die Bestimmung der ‚effektiven Recyclingquote‘ entscheidend ist, wie sich die Menge der in der Technosphäre akkumulierten Metalle verhält, der so genannte ‚domestic stock‘. Diese Menge steht zumindest im Prinzip für das Recycling zur Verfügung, auch wenn sie derzeit evtl. nur wächst und das Material noch nicht wieder in den Sekundärmetallhütten ankommt. Wirklich verloren sind nur diejenigen Mengen, die aus diesem Vorrat für das Recycling aus den verschiedensten Gründen nicht zurück gewonnen werden können, also die echten

¹³³ US Bureau of the Census 1975; US Bureau of the Census 1991

¹³⁴ Der bloß aktuelle Anteil von Recyclingmaterial an der gesamten Produktionsmenge von bestimmten Metallen sollte also nicht ‚Recyclingquote‘ genannt werden. Damit soll nicht gesagt werden, dass diesbezügliche Zahlen völlig uninteressant sind, vor allem nicht, wenn sie sich auf größere räumliche Einheiten am besten sogar auf die Weltproduktion beziehen. Wernick und Ausubel schlagen für den Anteil von direkt aus natürlichen Rohstoffen gewonnenen Materialien am gesamten Materialverbrauch die Bezeichnung ‚Virginity Index‘ vor (vgl. Wernick Ausubel 1999).

,dissipativen Verluste'¹³⁵. Rogich quantifiziert diese Verluste mit insgesamt 18,2 %, wobei er allerdings nur ein Jahr betrachtet¹³⁶.

Neben der Menge, die zurückfließt, interessiert unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten gerade auch die Qualität der Metalle, die auf der Basis von Recyclingmaterial produziert werden kann. Um Missverständnissen bei der Beurteilung der qualitativen ‚Erfolge des Metallrecyclings‘ vorzubeugen, müssen einige weitere Begriffsklärungen vorgenommen werden. Mit Blick auf die Qualität bzw. Wertigkeit des Recyclingmaterials ist die Unterscheidung wichtig zwischen ‚echtem Recycling auf gleichem Ordnungs- und Qualitätsniveau‘ und einem ‚down cycling‘, bei dem Qualitätsverluste hingenommen werden müssen¹³⁷. Im Metallbereich gelingt Recycling auf gleichem Qualitätsniveau vor allem dann, wenn reines bzw. sortenreines Material recycelt wird, am einfachsten ist dies bei der Verwertung von wohl definierten Neuschrotten möglich (z. B. Hüttenschrott oder Produktionsschrott). Gemischte Altschrotte (also Materialien, die eine Produktgebrauchsphase durchlaufen haben) führen beim Aluminium- und Stahlrecycling in der Regel zu Qualitätsverlusten aufgrund der auf diesem Wege eingeschleppten Störstoffe und vermischten Legierungsbestandteile (Störstoffe sind bei Stahl v. a. Cu und Sn, beim Aluminium Fe, Mn, Si, Cu und Zn). Derartige Störstoffe können aus der Schmelze mit vertretbarem Aufwand nicht wieder entfernt werden, weshalb z. B. Sekundäraluminium aus Altschrotten nicht mehr zu Knetlegierungen, sondern nur noch zu Gußlegierungen verarbeitet wird¹³⁸. Ein Beispiel für die dadurch erzwungene absteigende Kaskade des Aluminiumrecyclings von der Aluminiumfolie über Aluminiumfensterrahmen bis zum Aluminiumguss im Motorenbereich zeigt Abbildung 16 (aus Rombach 2004).

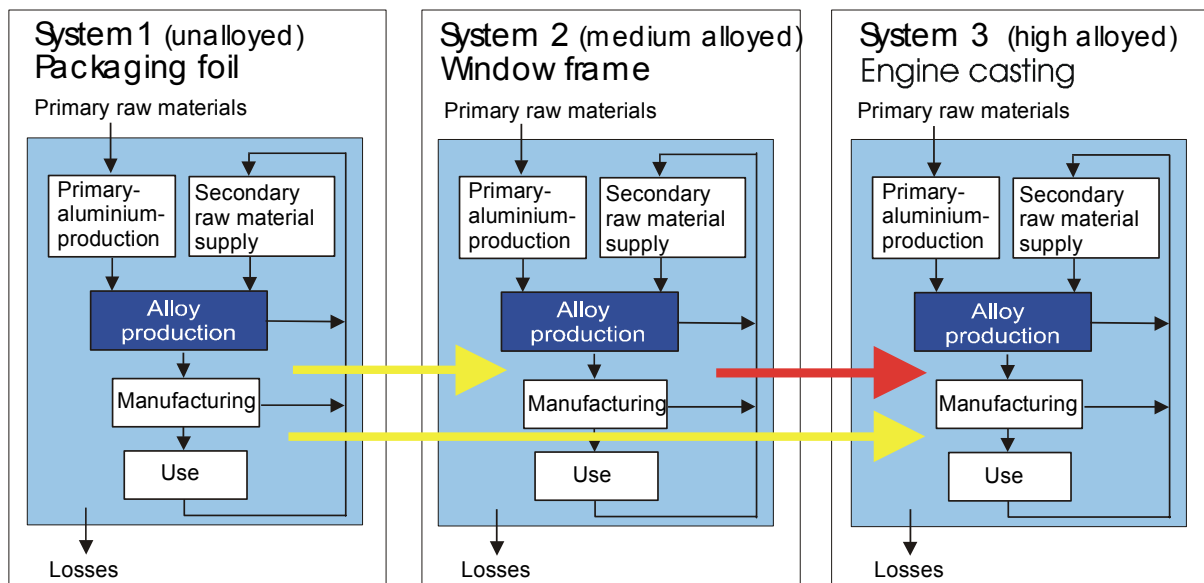


Abbildung 16_Absteigende Recyclingkaskade für Aluminium aufgrund zunehmender Gehalte an Störstoffen bzw. Legierungselementen (Aus: Rombach 2004)

¹³⁵ Das Material, das auf Müllhalden gelandet ist, könnte ggf. ja wieder zurück geholt werden.

¹³⁶ Er schlüsselt diese Verluste auch weiter auf nach Verlusten in postconsumer waste 13%, processing waste 5% und (echtem) dissipative use 0,2%, vgl. Rogich 1993

¹³⁷ In einigen Fällen ist auch ein ‚up cycling‘ möglich, also eine Qualitätsverbesserung im Recyclingprozess.

¹³⁸ Der Stoffstrom des Kupfers bildet hier aus verschiedenen Gründen eine Ausnahme. Kupfer wird in der Mehrzahl der Fälle ohnehin schon in höchstreiner Form eingesetzt (z. B. Elektrokabel). Zum anderen besteht im Recyclingprozess, insoweit er das nochmalige Durchlaufen der Elektrolyse beinhaltet, die Möglichkeit, so gut wie alle Störstoffe wieder zu entfernen.

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) hat den Qualitätsunterschieden im Recycling mit seinen Begriffsdefinitionen im Zusammenhang mit der von ihm herausgegebenen Richtlinie zum ‚Recyclinggerechten Konstruieren‘ gleich doppelt Rechnung getragen (vgl. VDI 1993a). Es wird unterschieden zwischen dem höherwertigen Produkt- und Komponentenrecycling einerseits, bei welchem die Produktgestalt erhalten bleibt und dem werkstofflichen Recycling andererseits, bei dem die Produktgestalt aufgelöst und nur das Material recycelt wird. Sodann unterscheidet er innerhalb dieser Typen Produktrecycling und Stoffrecycling noch einmal nach der Qualität bzw. Wertigkeit, indem er eine Differenzierung vornimmt zwischen *Wiederverwendung* (gleichwertiges Produkt- und Komponentenrecycling) und *Weiterverwendung* (minderwertigeres Produkt- und Komponentenrecycling) sowie *Wiederverwertung* (gleichwertiges Materialrecycling) und *Weiterverwertung* (minderwertigeres Materialrecycling).

Mit der Unterscheidung zwischen Produkt- und Komponentenrecycling und Materialrecycling wird ausdrücklich der Wertigkeitsunterschied zwischen diesen beiden Recyclingtypen betont. Strategien in Richtung auf eine Nachhaltige Metallwirtschaft können und dürfen sich nicht allein auf das Materialrecycling konzentrieren. In vielen Fällen liegen die sehr viel weiter reichenden Nachhaltigkeitspotentiale in der Intensivierung und ggf. auch Verlängerung des Produktgebrauchs.

Doch bleiben wir zunächst beim Materialrecycling und wenden wir uns noch einmal dessen quantitativen Aspekten zu, den so genannten Recyclingquoten. Auch diesbezüglich stellt sich die Frage, wie berechnet man diese am angemessensten? Was ist gemeint, wenn von ‚Sekundärmaterial‘ die Rede ist? Sind damit Produktionsschrotte gemeint (sog. ‚Neuschrotte,‘) oder Altschrotte, die ihre Produktgebrauchsphase hinter sich haben (sog. ‚post consumer‘ Schrotte)? Oder werden (wie es meist der Fall ist) die beiden Schrottarten vermischt, in welchem Verhältnis? Selbstverständlich ist es einfach, Hüttenschrott in derselben Hütte zu recyceln. Wenn die Hütte ineffizient arbeitet, also viel Hüttenschrott anfällt, trägt sie sogar zu einer hohen Recyclingquote bei. Dasselbe gilt für Produktionsschrott wie z. B. Stanzabfälle. Die wirklichen Herausforderungen für eine Nachhaltige Metallwirtschaft liegen deshalb im hochwertigen Recycling von Altschrotten.

Aussagen über Recyclingquoten sind nicht möglich, allein auf Basis der Mengen, der an einem Ort (in einer Region oder Nation) zu einem bestimmten Zeitpunkt anfallenden Schrotte. Genauso wichtig sind die Fragen: Wie wachsen oder sinken über die Zeit die Metallvorräte in der Technosphäre? Wie sieht die Import-Exportbilanz metallhaltiger Güter aus, wie die Schrottbilanz? Wie stark sind diese Zahlen durch zeitliche Produktionsschwankungen und /oder durch spezifische Produktionsstrukturen und/oder Wettbewerbssituationen in den Ländern geprägt? Sagen diese Zahlen überhaupt etwas aus über eine mögliche Streckung der Ressourcenverfügbarkeit durch Recycling? Die letztgenannte Frage muss klar mit ‚nein‘ beantwortet werden. Wenn wir Antworten auf diese Frage finden wollen, müssen weitere Begriffsdifferenzierungen vorgenommen werden, nämlich die oben schon angedeutete Unterscheidung zwischen Recyclingeffektivität und Recyclingeffizienz. Die Recyclingeffektivität bezieht sich auf die Frage, wie viel von einem bestimmten Material tatsächlich im Kreis geführt werden kann. Die Recyclingeffizienz bezieht sich einerseits auf den Recyclingaufwand, aber auch auf die Frage, welcher Anteil aus dem zurück kommenden Material tatsächlich zurück gewonnen werden kann. Die Recyclingeffizienz ist hinsichtlich dieses zweiten Aspekts ein Unterpunkt der Recyclingeffektivität. Sowohl die Recyclingeffektivität als auch die Recyclingeffizienz haben mit Verlusten zu kämpfen, die Recyclingeffizienz mit den Verlusten im Recyclingprozess (vergleichbar der ‚Ausbringungsrate‘ bei der Gewinnung von Metallen aus Erzen), die Recyclingeffektivität v. a. mit Verlusten in der Gebrauchsphase. Die wichtigsten Variablen sind bei der Recyclingeffizienz (im Sinne der Ausbringungsrate) damit eher der ‚technische Fortschritt‘ in der Recyclingwirtschaft und bei der Recyclingeffektivität die Art der Produktgestaltung, Produktnutzung und insbesondere auch der Erfolg des Sammelns und Sortierens im Anschluss an die Produktnutzung. Zur Bestimmung der ‚Effektivität‘ und der ‚Effizienz‘ des Recyclings unter Gesichtspunkten des Ressourcenverbrauchs und der Ressourcenverfügbarkeit hat Rombach die Begriffe ‚ressourcen-orientierte Recyclingquote‘ und ‚technische Recyclingquote‘ eingeführt (vgl. Rombach 2004). Die ‚technische

Recyclingquote' bezieht sich auf die Effizienz, mit der aus Schrotten und Abfällen wieder verwertbare Metalle produziert werden. In sie gehen also vor allem die Verluste des Recyclingprozesses selbst ein. Die technische Recyclingquote für verschiedene Anwendungsgebiete von Aluminium bewegte sich in Deutschland 1997 zwischen 92,2% bei Gebäudeschrott und gemischtem Schrott, 79,1 % bei Elektronikschrott, 75,8% bei Altfautos und 12,2% für Aluminium im Hausmüll (vgl. Rombach 2004). Die ‚ressourcenorientierte Recyclingquote‘ bezieht sich dagegen auf den gesamten Materialzyklus. Sie zielt auf das was wir die ‚Recyclingeffektivität‘ genannt haben und damit auf eine der entscheidenden Fragen einer ‚Nachhaltigen Metallwirtschaft‘, nämlich inwieweit diese in der Lage ist, die Metalle wirklich nachhaltig im Kreis zu führen.

Leider fehlen Informationen zur ‚ressourcenorientierte Recyclingquote‘ (Recyclingeffektivität) noch in den meisten Fällen. Immerhin konnten Rombach und Wolf für den Aluminiumstoffstrom in Deutschland einiges zusammen tragen. Da die ‚ressourcenorientierte Recyclingquote‘ sich auf den erfolgreichen Rückfluss von Material aus bestimmten Anwendungsbereichen (bzw. aus einer Region) bezieht, bis zum Wiederangebot als Metall, müssen über z. T. sehr lange Zeiträume die Einsatzgebiete, die Einsatzdauer und mögliche weitere ‚technische Zwischenlager‘ für (Alt)Produkte und Schrotte berücksichtigt werden. Die Bestimmung dieser ‚Reservoirs‘ und ihres Füllungsgrades (also des ausdifferenzierten domestic stocks) bereitet verständlicherweise große Probleme. Die ‚ressourcenorientierte Recyclingquote‘ für Aluminium bewegte sich nach Rombach in Deutschland zwischen 92,2% beim Aluminiumeinsatz in Gebäuden, 66,5% beim Einsatz in Elektro- und Elektronikgeräten, 31,4 % beim Einsatz in Autos und nur 2,9% beim Einsatz von Aluminium in Produkten, die irgendwann im Hausmüll landen. Mit Ausnahme des Gebäudeschrotts, der offenbar sehr gut erfasst wird, treten die größten Verluste bei der mangelhaften Erfassung nach der Gebrauchsphase auf. Im Hausmüll spielen zusätzlich die Aufbereitungsverluste eine bedeutende Rolle (vgl. Abbildung 17).

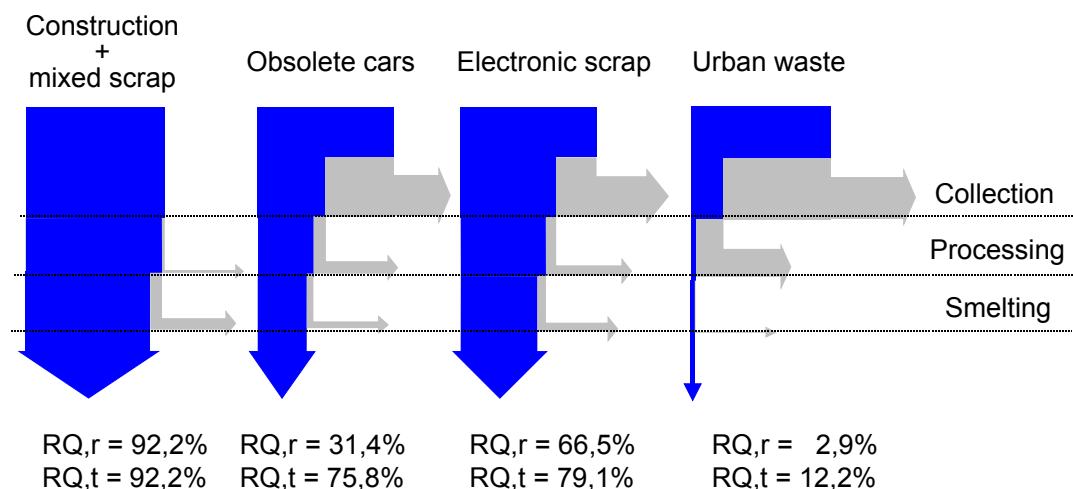


Abbildung 17_Technische und ressourcen-orientierte Recyclingquoten für Aluminiumprodukte (aus Rombach 2004 nach Wolf 2000)

Solche Informationen zur Recyclingeffektivität, wie sie von Rombach für die Aluminiumströme erhoben wurden, sind wie erwähnt noch selten. Für den weltweiten Stahlfluss existieren nur Schätzungen. Sie besagen, dass innerhalb von 20 Jahren ungefähr 70% des Materials in Recyclingprozesse zurückfließen. Der Hauptanteil der 30%igen Verluste wird dabei der Korrosion zugeschrieben (vgl. Willeke u. a. 1994).

Kupferkreisläufe werden derzeit intensiv von einer Arbeitsgruppe um Th. Graedel an der Universität Yale untersucht. Auch diese Gruppe verfolgt das Ziel, Aussagen über dissipative Verluste machen zu können. Wobei dissipative Verluste von Kupfer in die Umwelt nicht mehr allein als Materialverluste mit Blick auf die Ressourcensituation zu beklagen sind, sondern

aufgrund der Phytotoxizität von Kupfer auch mit Blick auf etwaige problematische Umweltwirkungen durch Kupfereintrag in die Biosphäre¹³⁹. Aufgeschlüsselt und modelliert wurde von der Gruppe u. a. die europäische Kupferverwendung bzw. der europäische Kupferkreislauf nach den wichtigsten Kupfereinsatzgebieten. In diesem Zusammenhang wurden deren durchschnittliche Rücklaufzeiten (RT years) eingeschätzt sowie diejenigen Anteile des Kupfers, die aus diesen Gebieten als Schrott zurückgeführt werden (scrap), bzw. die in den Abfallstrom gelangen (waste). Mit S/W wird dabei das Verhältnis Schrott zu Abfall bezeichnet (vgl. Tabelle 5 aus Graedel et al 2002).

Tabelle 5_ Principal Uses of Copper 1990 (aus: Graedel et al 2002)

#	Category	Use %	RT (years)	S/W
1	Building wire	14	45	50/50
2	Tube	12	60	45/55
3	Alloy rod	11	20	10/90
4	Magnet wire	9	15	50/50
5	Telecommunication wire	8	50	25/75
6	Power cable	8	40	60/40
7	Copper Sheet and strip	8	50	60/40
8	Alloy sheet and strip	7	25	20/80
9	Casting alloys	6	30	50/50
10	Motor vehicle wire	4	10	80/20
11	Appliance wire	4	20	50/50
12	Bare wire	3	10	0/100
13	Copper rod	2	40	60/40
14	Alloy tube	2	35	95/5
15	Wire (other)	1	5	0/100
16	Alloy wire	1	5	5/95
17	Chemical and powder	< 1	1	5/95

Wenn diese Abschätzungen stimmen hinsichtlich der doch beträchtlichen Mengen von Kupfer, die aus einigen Anwendungen in den Abfallstrom gelangen, gibt es auch beim Kupfer noch viel zu tun. Immerhin kann das Recycling des besonders wertvollen Metalls Kupfer schon in mancherlei Hinsicht als vorbildlich gelten. Das von der Gruppe erarbeitete statische Modells des Europäischen Kupferkreislaufs weist für das Jahr 1994 einen Kupferinput in die Nutzungsphase (Technosphäre) von 3,43 Mio. t aus (was ca. 8 Kg/Kopf entspricht). Gleichzeitig gehen 920.000 t Cu pro Jahr in den Abfallstrom. Das bedeutet, dass der ‚domestic stock‘ in den technischen Reservoiren in diesem Jahr um 2,6 Mio t pro Jahr angewachsen ist, was 6 Kg/Kopf entspricht (vgl. Abbildung 18). Von den 920.000 t Kupfer, die 1994 in den Abfallstrom gingen, konnten nur ca. 50% für das Recycling wieder gewonnen

¹³⁹ Vgl. dazu und auch zu anderen dissipativen Einträgen von Schwermetallen in die Umwelt van der Voet et al 2000.

werden¹⁴⁰. Die dissipativen Verluste über den Abfallstrom in die Umwelt beliefen sich somit für Europa auf 485.000 im Jahr 1994. Davon landeten 480.000 t in Deponien und knapp 5.000 t werden über Klärschlämme sowie direkte Emissionen auf Böden, in die Atmosphäre und Hydrosphäre ausgetragen. Die Gruppe um Graedel leistet – aufbauend auf entsprechenden Arbeiten in Skandinavien¹⁴¹ – hinsichtlich der Erfassung und Modellierung von Metallströmen Pionierarbeit. Wir müssen uns deshalb hier vorerst mit solchen Punktaufnahmen begnügen. Da den dargestellten dissipativen Verlusten in dem Modell für das Jahr 1994 noch keine Gebrauchszeiten (und damit frühere inputs) gegenüber gestellt werden können, lässt sich eine ‚ressourcenorientierte Recyclingquote‘ des europäischen Kupferkreislaufs noch nicht bestimmen. Trotzdem ergeben sich auch schon aus dieser Analyse der Abfallströme für die Beurteilung der Nachhaltigkeit wesentlich wichtigere Informationen als aus dem Anteil der Sekundärmaterialien an der Primärproduktion. Dass nur ca. 50 % der Kupfermenge, die in den Abfallstrom eintraten, aus diesem zurück gewonnen werden konnten, zeigt immerhin, dass wir auch bei einem Material wie Kupfer, bei dem aufgrund seines hohen Werts die Recyclinganstrengungen ohnehin schon traditionell besonders hoch sind, noch weit von einer Nachhaltigen Metallwirtschaft entfernt sind.

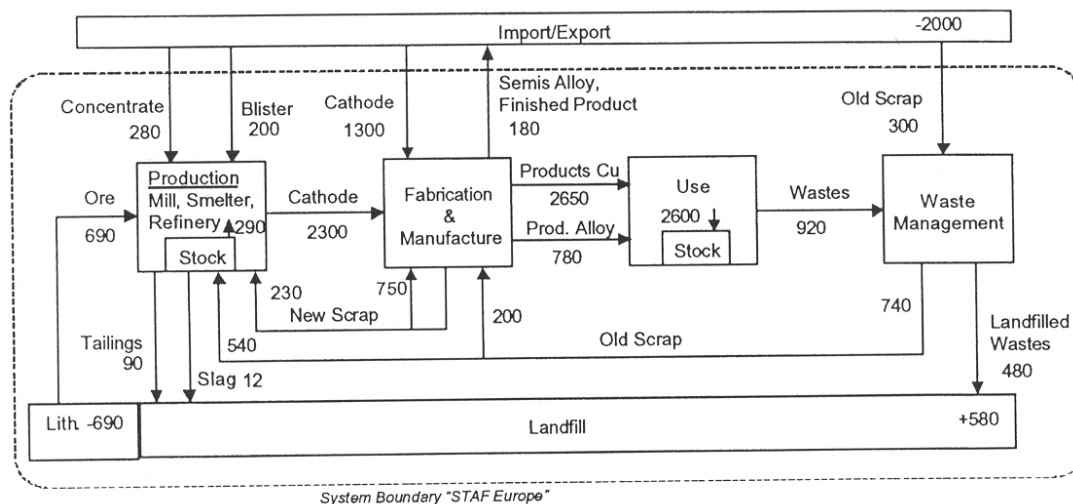


Abbildung 18_ Der Kupferkreislauf in Europa 1994
(aus: Spatari et al 2002)

Wenn es im Zuge von Nachhaltigkeitsstrategien durch gezielte Bemühungen gelingt, die ressourcenorientierte Recyclingquote signifikant zu erhöhen, werden sich die Folgen eines anderen seit langem bekannten (Dissipations)Problems dramatisch verschärfen, die Verunreinigung der Sekundärmetallstoffströme durch Störstoffe, meist Metalle, die mit den heute ökonomisch einsetzbaren Techniken nicht mehr aus den Metallschmelzen entfernt werden können - z. B. Kupfer und Zinn in Stahl und Aluminium. (vgl. Marique 1997, Karlsson 2004, Savov; Janke 1998; Janke, Savov, Vogel 2004). Derzeit scheint dieses Problem noch nicht allzu drängend zu sein. Sekundärstahlhütten erreichen die erforderlichen Höchstgehalte an Störstoffen durch Verdünnung mit Primärmetall, oder sie liefern ‚störstofftolerante‘ Produkte wie Baustahl¹⁴². Die Sekundäraluminiumhütten produzieren derzeit ohnehin vor allem Gussaluminiumqualitäten, welche geringere Reinheitsanforderungen haben als Knetlegierungen. Beide ‚Lösungswege‘ der

¹⁴⁰ Vgl. Bertram et al 2002 und Spatari et al 2002. Ein von Nilarp erarbeitetes Modell des Schwedischen Kupferkreislaufs von Anfang der 90er Jahre geht davon aus, dass 37% der in die Abfallwirtschaft eingehenden Kupfergehalte (10.000 t / a) auf der Deponie landen (vgl. Nilarp 1994, Modell wiedergegeben in Karlsson 2004)

¹⁴¹ Vgl. Landner; Lindström 1999

¹⁴² Baustahl ‚gewinnt‘ zunächst durch die Störstoffe – zumindest hinsichtlich der Festigkeit.

Störstoffproblematik sind aber alles andere als nachhaltig. Sind die hochwertigen störstoffarmen Metalle erst einmal in Produkte eingeflossen und bei den Kunden gelandet, wird nach heutigem Stand der Technik – entgegen aller wohlklingender Werbesprüche - weder aus einer Autokarosserie wieder eine Autokarosserie noch aus einer Aluminiumfolie wieder eine Aluminiumfolie¹⁴³. Auch aus Konservendosen werden nicht wieder Konservendosen. Würde man eine Charge von älterem nicht chemisch vorentzinntem Konservendosenschrott wieder einschmelzen, würde das z. B. zu einem Zinngehalt von 0,3% im Stahl führen¹⁴⁴, in unlegiertem Tiefziehstahl werden aber nur maximal 0,1% toleriert. Zudem kommen ja auch die Produkte mit geringeren Anforderungen an die Metallqualitäten (bzw. mit höheren Störstoffwerten) nach der Nutzungsphase wieder zurück, mit der Perspektive, dass sich der Störstoffgehalt so langsam aufschaukelt. Es wäre schon ein seltsamer ‚Sachzwang‘, wenn auf dem Weg in eine nachhaltigere Metallwirtschaft die Nachfrage nach Primärmetall nicht mehr vor allem durch einen immer noch steigenden Metallbedarf getrieben würde, wie es derzeit noch der Fall ist, sondern durch die ‚technischen‘ Notwendigkeiten einer ‚Verdünnung‘ von Störstoffen. Doch auch die andere Perspektive, dass wir eines Tages gezwungen sein können, bestimmte Schrottfractionen nicht wieder in den Metallkreislauf zurückzugeben, sondern wegen zu hoher Störstoffgehalte zu ‚entsorgen‘, mutet aus heutiger Sicht nicht minder seltsam an.

Die Vermeidung der Anreicherung von Störelementen kann und muss insbesondere an zwei Punkten ansetzen, erstens bei der Produktgestaltung (recyclinggerechte Konstruktion und Werkstoffwahl) und zum anderen beim separierten Sammeln und bei den Aufbereitungstechniken für Schrotte¹⁴⁵.

6.5 Die Vermeidung dissipativer Verluste- Eine Strategie mit ‚doppelter Dividende‘

Zusammenfassend lässt sich sagen: Die weitreichendsten Probleme auf dem Weg zu einer Nachhaltigeren Metallwirtschaft scheinen an den Grenzen zwischen Ökosphäre und Technosphäre aufzutreten, als Probleme der Ressourcenverfügbarkeit einerseits und als Probleme von Emissionen und Abfällen andererseits. Die entscheidenden Grenzen der ‚Ressourcen-Verfügbarkeit‘ liegen aber nicht in ihrem schlichten physikalischen ‚Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein‘, sondern im Aufwand, insbesondere in den Kosten und den ökologisch negativen Begleiterscheinungen ihrer Erschließung: Nicht alle metallischen Ressourcen können bzw. ‚dürfen‘ so gesehen zu Reserven werden, weil der steigende Aufwand beim Abbau immer ärmerer oder problematischerer Erze an die Grenzen der Aufnahmekapazität der Senken stößt. Wir haben es somit hier mit einer ähnlichen Problemlage zu tun wie bei den fossilen Energiequellen, deren Nutzung vermutlich sehr viel rascher durch Limitierungen des CO₂-Ausstoßes begrenzt werden wird, als durch ‚Erschöpfung‘ der primären Lagerstätten.

Eine Verringerung der dissipativen Verluste von Metallen in die Ökosphäre bringt insbesondere bei Metallen, die auch problematische Umweltwirkungen nach sich ziehen, doppelten Gewinn: einerseits im Sinne der Ressourcenschonung und andererseits im Sinne der Umweltvorsorge und des Erhalts des ökologischen und bioproduktiven Naturkapitals

¹⁴³ Bekanntlich wird Schrott auch bei der Neustahlerzeugung eingesetzt, aber in geringen Mengen und mit möglichst geringem Gehalt an Störstoffen. Die Herstellung von Tiefziehstahl aus 100% Schrott gelingt nur, wenn man ausschließlich Neuschrott - also in der Regel absolut sortenreine Produktionsabfälle - verwendet. Auch aus einer Charge von reinem Dosenschrott, bei dem alle Aluminiumdosen zu 100% aus Aluminium bestehen, ließe sich wieder eine Knetlegierung gewinnen.

¹⁴⁴ In den vergangenen Jahren konnte allerdings die aufgetragene Zinnmenge drastisch gesenkt werden. Der Korrosionsschutz wird mittlerweile durch Lack erzeugt. Zinn dient als ‚Schmiermittel‘ beim Tiefziehen (Mitteilung Krüger 2004).

¹⁴⁵ Aktuell konzentrieren sich die entsprechenden Maßnahmen noch auf die Aufbereitungstechnik.

Auch eine Verringerung der dissipativen Verluste von Metallen innerhalb der Technosphäre bringt doppelten Gewinn, insbesondere bei denjenigen Metallen, die als problematische Verunreinigungen bzw. Störstoffe in andere Werkstoffströme eingehen. Es geht also um die Hochwertigkeit des Recyclings, insbesondere um das Getrennt-Halten verschiedener Metalle und Legierungen. Nur das Vermeiden von Verunreinigungen führt zu einem hochwertigen Recyclingmaterial, zur Verringerung von nachträglichem Reinigungsaufwand und zu einem hochwertigen Metallvorrat in der Technosphäre (domestic stock).

Auch wenn sich die Probleme an den Schnittstellen zwischen Öko- und Technosphäre zeigen, so liegen die entscheidenden Stellschrauben zur Verringerung der dissipativen Verluste sowohl in die Ökosphäre als auch in die Technosphäre weniger in der Ressourcen- oder in der Abfallpolitik, sondern in der Art und Weise, wie innerhalb der Technosphäre mit den Metallen umgegangen wird, also insbesondere in der Produktgestaltung und in der Produktnutzung, sowie darauf aufbauend dann auch bei der Demontage und beim Recycling. Nur ein Stoffstrommanagement, das sich im Wesentlichen auf Produktgestaltung und Produktnutzung konzentriert, mit dem Ziel nicht allein die Ressourcenproduktivität zu erhöhen¹⁴⁶, sondern insbesondere auch die dissipativen Verluste zu minimieren und die Qualität der Kreisläufe zu erhalten (bzw. möglichst zu steigern), kann uns so gesehen dem Ziel einer Nachhaltigen Metallwirtschaft wirklich näher bringen. Noch fehlen dazu allerdings ganz wesentliche Informationen und Instrumente. Dazu gehören ohne Zweifel zum einen Stoffstrommodelle, mit denen nicht nur zeitlich punktförmige Input-output-Relationen zwischen Öko- und Technosphäre dargestellt werden können, sondern mit denen dynamisch der Weg von Stoffströmen durch die Technosphäre verfolgt werden kann. Zum anderen gehört dazu ein Maß für die Qualität von Kreisläufen. Die vorliegenden Ansätze zu Exergie- und insbesondere zu Entropiebilanzen sind wichtige Beiträge in diese Richtung (vgl. Ayres 2004, Rechberger 2002 a und b, Gößling-Reisemann 2001 und 2004).

¹⁴⁶ Im Sinne einer Minimierung des Ressourceninput per Nutzeneinheit, wie es z. B. mit dem MIPS-Konzept (material input per service unit) verfolgt wird.

7 Entropiebilanz der Kupferherstellung aus Roherzkonzentraten und Sekundärmaterialien - Ressourcenverbrauch eines metallurgischen Prozesses

147

7.1 Einleitung

Im Rahmen einer Promotion wurde am II. Institut für Experimentalphysik der Universität Hamburg eine neue Methode zur Erfassung des Ressourcenverbrauchs von industriellen Prozessen entwickelt¹⁴⁸. Dabei wird der Verbrauch und die Nutzungseffizienz von stofflichen und energetischen Ressourcen auf der Basis einer gemeinsamen Größe, der Entropie ermittelt. Dieser Ansatz basiert auf der Erkenntnis, dass nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik jeder natürliche Prozess mit einer Dissipation von Energie und/oder Materie verknüpft ist und dass das Ausmaß dieser Dissipation gerade durch die produzierte Entropie beschrieben wird. Ein fiktiver, thermodynamisch optimaler (also reversibler) Prozess hätte eine ausgeglichene Entropiebilanz, d.h. es würde keine Entropie erzeugt und somit wäre die Netto-Dissipation gleich Null. Jeder andere Prozess ist umso ineffizienter, je mehr Entropie erzeugt wird. So lässt sich die Effizienz von Prozessen mit äquivalenten Produkten oder Dienstleistungen direkt miteinander vergleichen. Für viele Prozesse lässt sich darüber hinaus eine theoretische Mindestentropieerzeugung bestimmen¹⁴⁹. In einigen Fällen lässt sich auch die "Dienstleistung" eines Prozesses in Entropie-Einheiten ausdrücken. Dies ist insbesondere bei stofflichen Umsetzungsprozessen, wie beispielsweise der Metallgewinnung, der Fall. In solchen Fällen kann man den Quotienten aus entropischem Aufwand (also der Gesamtentropieproduktion) und dem entropischem Nutzen (also der nützlichen Entropieproduktion) berechnen und erhält ein absolutes thermodynamisches Maß für die Effizienz des Prozesses.

Am Beispiel der Kupfererzeugung aus Erzkonzentraten und Sekundärmaterialien wurde diese Methode nun erstmalig im industriellen Umfeld erprobt. Besonders interessant an diesem Fallbeispiel ist die Gegenüberstellung von Konzentrationsprozessen auf der einen Seite und der dafür erforderlichen Dissipation von Stoffen und Energie auf der anderen Seite. Die Entropiebilanz stellt somit ein Maß dar für den Gesamtaufwand von stofflichen und energetischen Ressourcen, um eine bestimmte Menge reinen Kupfers zu erzeugen. Die detaillierte Analyse der Entropieproduktion in Hinsicht auf einzelne Schritte des Gesamtprozesses, legt auf einfache Weise die dissipativen Schwachpunkte offen. An diesen Punkten könnte dann eine Optimierung der Prozessführung (in ökologischer und ökonomischer Hinsicht) ansetzen.

7.2 Zur Methode

Das Konzept der Entropie wurde zunächst von Clausius (1822-1888) benutzt, um die Verfügbarkeit von Energie zu beschreiben. Seine Analyse des Carnot-Prozesses lieferte die

¹⁴⁷ Diese Untersuchung wurde im Rahmen eines Promotionsprojektes unter Anleitung von Prof. H. Spitzer (Universität Hamburg, Fachbereich Physik) und Prof. A. von Gleich (Fachhochschule Hamburg, Fachbereich Maschinenbau und Produktion) durchgeführt. Dafür wurden Datenerhebungen anhand von Fachliteratur und Gesprächen mit Technikern und Ingenieuren der Norddeutschen Affinerie in Hamburg (NA) vorgenommen und diese anhand eines Prozessmodells ausgewertet.

¹⁴⁸ Gößling 2001

¹⁴⁹ Ein anschauliches Beispiel ist die Raumheizung, bei der mindestens die Dissipation der Raumwärme an die Umwelt in der Entropiebilanz zu Buche schlägt

Erkenntnis, dass die Menge an verfügbarer Energie in einem abgeschlossenen (isolierten) System nur abnehmen kann, oder anders ausgedrückt, die Entropie nur zunehmen kann. Die erzeugte Entropie ist dabei das Maß für die Dissipation und damit für die Irreversibilität. Während ein abgeschlossenes System so unweigerlich dem Zustand maximaler Entropie entgegenstrebt (Wärmetod des Weltalls), kann die Entropie in einem offenen (Sub-)System durchaus konstant bleiben oder sogar abnehmen. Dabei wird die intern erzeugte Entropie (aus irreversiblen Prozessen) entsorgt, indem niederentropie, einfließende Stoff- oder Energieströme mit der Entropie beladen und als hochentropie Ströme an die Umgebung abgegeben werden.

Ansatzpunkt der hier anzuwendenden Methode ist die von Stahl¹⁵⁰ vorgeschlagene entropische Effizienz als Quotient aus nützlicher und gesamter Entropieerzeugung¹⁵¹. Dem zugrunde liegt eine detaillierte Auflistung der Entropiegehalte der ein- und ausfließenden Stoff- und Energieströme eines Prozesses. Dafür werden die absoluten Mengen der Stoffflüsse, deren Zusammensetzung und ihr Temperaturniveau benötigt. Für die Energieströme muss ebenfalls ihre Größe bekannt sein, und für den Fall des Wärmeübergangs auch die beteiligten Temperaturniveaus. Die entsprechenden Entropieinhalte können dann aus thermodynamischen Tabellenwerken entnommen und/oder mit Hilfe von physikalischen Formeln berechnet werden. Eventuell fehlende Daten können, bei Kenntnis der ablaufenden chemischen und physikalischen Prozesse, ersatzweise berechnet oder abgeschätzt werden. Die Datengrundlage ist somit vergleichbar mit der einer detaillierten Sachbilanz im Rahmen einer Ökobilanz.

Wie auch bei der Ökobilanz muss man im Vorhinein entscheiden, wie das zu untersuchende System gegenüber der Umgebung abgegrenzt ist. Die Systemgrenze wird in diesem Fall so definiert, dass sowohl die Inputströme, als auch die Outputströme noch zum System dazu gehören. Bildet man dann die Gesamtbilanz, so stellt der Entropieüberschuss gerade die im System erzeugte Entropie dar. Als absoluten Wert kann man diesen bereits mit den Werten von alternativen Prozessen vergleichen, um den thermodynamisch optimalen zu finden. Kann man zusätzlich eine Mindestentropieerzeugung definieren, so lässt sich auch die oben erwähnte entropische Effizienz bestimmen. Um eine einheitliche Berechnungsgrundlage zur Verfügung zu haben (auch im Hinblick auf den späteren Vergleich mit alternativen Prozessen), bietet es sich an, alle Daten auf die Produktion von einer bestimmten Menge Kupfer zu beziehen (z.B. 1 t Kupferanoden oder 1 t Reinkupfer).

Um komplexere Prozesse analysieren zu können, werden diese in Subprozesse zerlegt, welche dann einzeln bilanziert werden. Im Falle der Kupfererzeugung ergeben sich die Subprozesse als identisch mit den einzelnen Verfahrensschritten (Schwebeschmelzverfahren, Konvertierung, Elektrolyse, etc.). Für eine Gesamtbilanz müssen diese einzelnen Module nur zusammengerechnet werden.

Die Methode stellt hohe Ansprüche an die Detailliertheit der Daten. Dies stellte auch die größte Hürde bei der Durchführung der unten beschriebenen Untersuchung dar. Um der tatsächlichen Situation bei der NA möglichst nahe zu kommen, wurde daher folgender Weg gewählt. Die genauen Produktionsdaten bei der NA waren aus Wettbewerbsgründen zunächst nicht erhältlich. Stattdessen wurde erst aus Literaturdaten ein Stoffflussmodell erstellt, welches zumindest näherungsweise die Flüsse bei der NA beschreibt. Dieses wurde dann dem Umweltbeauftragten und dem leitenden Ingenieur für die Roherzverhüttung vorgestellt und diese um Kommentare gebeten. Die angebrachten Korrekturen der beiden NA-Ingenieure dienten dann zu einer Verbesserung des Modells und einer verbesserten Anpassung an die NA-Verhältnisse. Später wurde das Modell und die Ergebnisse noch mit

¹⁵⁰ Stahl 1996 und Stahl 1998

¹⁵¹ Dabei ist die nützliche Entropieerzeugung kein rein physikalischer Begriff, sondern muss erst interpretiert werden. Beim Vergleich äquivalenter Prozesse sollte dies jedoch keine Probleme bereiten. Zum Beispiel ist für ein Gebäudeheizungssystem die nützliche Entropieproduktion gerade der Quotient aus umgesetzter Wärmemenge und Außentemperatur, der bei vorgegebener Wärmeleitfähigkeit der Außenwände nur von der Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen abhängt.

dem damaligen Leiter des Instituts für Metallhüttenkunde und Elektrometallurgie der RWTH Aachen und dem Vorstandsvorsitzenden der NA, einem seiner Schüler, diskutiert. Die Datenlage konnte so noch einmal verbessert werden.

7.3 Untersuchte Prozesse der Primärkupfererzeugung

Für die Kupferherstellung aus Erzkonzentraten stehen mehrere Prozesse zur Auswahl, deren Einsatz von verschiedensten Bedingungen abhängt (Qualität und Zusammensetzung des Konzentrats, lokale Infrastruktur, Energiepreise, Umweltauflagen etc.). In diesem Projekt wird eine Prozesskette zugrunde gelegt, die sich an den Anlagen der Norddeutschen Affinerie Hamburg orientiert¹⁵².

Nach Anlandung und Lagerung der Erzkonzentrate besteht die Hauptprozesskette der Reinkupferherstellung¹⁵³ aus den Schritten

Schwebeschmelzofen → Konverter → Anodenofen → Elektrolyse.

Natürlich ist jeder dieser Schritte wiederum mit vielen anderen vor- oder nachgelagerten Prozessen verknüpft, so dass sich ein Prozessnetz ergibt, das letztlich eine ganze Reihe von Produkten erzeugt. Eine Übersicht zeigt Abbildung 19.

¹⁵² Die hier zugrunde gelegten Daten entsprechen nicht in allen Fällen exakt den tatsächlichen Produktionsdaten bei der NA. Lediglich die Art der Prozessführung und die Größenordnung der umgesetzten Stoff- und Energiemengen wurden nach Vorgaben der NA modelliert.

¹⁵³ Das Endprodukt der Elektrolyse sind Kupferkathoden mit einem Kupfergehalt von 99,99%.

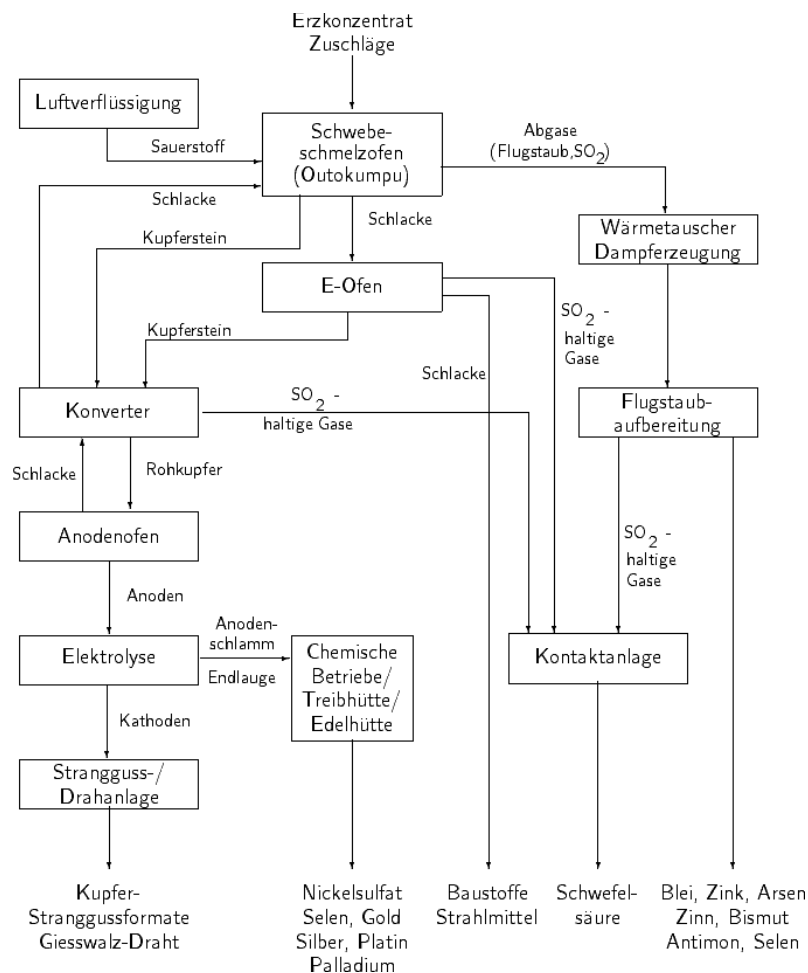


Abbildung 19_ Schematische Darstellung der Kupfererzeugung aus Erzkonzentraten, nach: Bartholomé & Ullmann 1985; Norddeutsche Affinerie o.J.; Krüger et al. 1995

In diesem Projekt wurden nun die oben genannten Hauptprozesse und, soweit möglich, die Aufbereitung der Abgase (z.B. Wärmerückgewinnung oder Flugstaubaufbereitung) mittels einer Entropiebilanz untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im Folgenden vorgestellt.

7.3.1 Beispiel-Prozess: der Schwebeschmelzofen

Für dieses Teilprojekt wurde ein Schwebeschmelzofen nach Art des Outokumpu-Prozesses zugrunde gelegt, wie er z.B. in Davenport & Partelpoeg 1987 beschrieben ist. Als Bezugsgröße für die Entropiebilanz wird von der Produktion von einer Tonne Kupferstein (dem Hauptprodukt des Outokumpu-Prozesses) ausgegangen. Nach Davenport & Partelpoeg 1987 und Krüger et al. 1995 ergibt sich damit die in Tabelle 6 angegebene Stoff- und Energiebilanz:

Tabelle 6_ Stoff- und Energiebilanz des Outokumpuprozesses bezogen auf die Erzeugung von 1 t Kupferstein

Input		Output	
Erzkonzentrat	2,14 t	Kupferstein	1,00 t
Zuschläge	0,14 t	Schlacke	1,18 t
Flugstaub ¹⁵⁴	0,10 t	Flugstaub	0,10 t
Konverterschlacke	0,27 t	Abgas	1592 Nm ³
Luft	1275 Nm ³	Wärmeleitungsverluste	1195 MJ
Sauerstoff	293 kg	Wärmestrahlungsverluste	15 MJ
Heizöl	38 kg		
Erdgas	5,4 Nm ³		
el. Energie	14 kWh		

Im Anschluss werden dann für die einzelnen Stoff- und Energieströme aus Tabelle 1 die Entropieinhalte berechnet. Dazu ist es nötig, ihre genaue Zusammensetzung und ihren thermodynamischen Zustand zu kennen. Da diese Daten in der Literatur nicht immer angegeben sind, mussten einige Annahmen gemacht werden¹⁵⁵. Ist die Zusammensetzung ermittelt, ergeben sich automatisch die Stoffmengen y_i (in Mol) und die Molanteile n_i in der Mischung. Die Gesamtentropie S_g eines Stoffstroms berechnet sich dann nach

$$S_g = \sum_i s_i y_i + S_m,$$

wobei s_i die molare Entropie der Komponente i bei der Temperatur des Stoffstroms (in diesem Fall 298,15 K) bezeichnet und in thermodynamischen Tabellenwerken¹⁵⁶ nachgeschlagen werden kann. S_m ist die Mischungsentropie und berechnet sich folgendermaßen¹⁵⁷:

$$S_m = -R \sum_i n_i \ln y_i$$

7.3.2 Beispiel-Stoffstrom: Kupfererzkonzentrat

Als Beispiel für die Berechnung des Entropiegehalts eines Stoffstroms sei hier kurz der Berechnungsweg für die Zusammensetzung des Erzkonzentrats gegeben. Nach Davenport & Partelpoeg 1987 ist das bei der NA eingesetzte Konzentrat entsprechend Tabelle 7 zusammengesetzt.

¹⁵⁴ recycled aus Outokumpu Prozess

¹⁵⁵ für eine genauere Diskussion siehe Gößling 2001

¹⁵⁶ wie z.B. CRC 1996 oder Barin 1989

¹⁵⁷ siehe Baehr 1996

Tabelle 7_ Zusammensetzung des Erzkonzentrats in Gewichtsprozent nach Davenport & Partelpoeg 1987

Komponente	Cu	Fe	S	SiO ₂	C	Al ₂ O ₃	Zn	Pb	H ₂ O	As	undef.
Anteil [%]	29	23	28	7	2	2	1	0,3	0,3	0,24	7

Zur Berechnung des Entropieinhalts dieser Mischung ist es nun aber entscheidend, in welcher chemischen Verbindung die einzelnen Komponenten vorliegen. Typischerweise liegen Kupfer, Eisen und Schwefel zusammen als CuFeS₂ vor. Entsprechend der Atomgewichte müsste das Massenverhältnis dann 29:25,5:29,3 (Cu:Fe:S) sein, was in etwa den tatsächlich vorliegenden Verhältnissen entspricht. Entsprechend kann man die Tabelle 7 dahingehend korrigieren und einen Anteil von 83,8% CuFeS₂ annehmen. Die Elemente Zn, Pb, und As liegen meist sulfidisch vor, was hier entsprechend angenommen wird. Schaut man die Stoffströme weiter hinten in der Prozesskette an, so fehlen in Tabelle 2 noch Calciumoxid und Nickel. Diese müssen, zumindest zum Teil, die 7% des Erzkonzentrats ausmachen, die in Tabelle 2 undefiniert bleiben¹⁵⁸. Wir sehen hier ein typisches Beispiel für das Vorgehen der iterativen Bestimmung der Stoffströme: Erkenntnisse über die Zusammensetzung der Stoffströme am Ende der Prozesskette gehen in die Berechnung der Stoffströme am Anfang der Prozesskette ein. Diese Art Modellierung geht am einfachsten über iterative numerische Verfahren (wie beispielsweise das Newton-Raphson-Verfahren) oder von Hand mittels mehrerer Durchläufe von Konsistenzchecks und Korrekturen der Zusammensetzungen. Für das Erzkonzentrat erhält man dann als Grundlage für die Entropieberechnung die in Tabelle 8 angegebene Zusammensetzung.

Tabelle 8_Berechnete Zusammensetzung des Erzkonzentrats

Komponente	CuFeS ₂	SiO ₂	C	Al ₂ O ₃	ZnS	PbS	H ₂ O	As ₂ S ₃	Ni	CaO
Anteil [%]	84,42	7,40	2,30	2,24	2,12	0,35	0,30	0,30	0,05	0,52

Nimmt man weiter an, dass das Erzkonzentrat in den Prozess mit einer Temperatur von 298,15 K (Standardbedingungen) eintritt, so ergibt sich für 2,14 t Konzentrat ein Entropieinhalt von $1,65 \times 10^6$ J/K.

7.3.3 Wärmeverluste

Die Kenntnis der Wärmeverluste der einzelnen Prozesse ist wichtig für die korrekte Berechnung der Entropiebilanz. Die Werte dafür lassen sich in der Regel aus einer Energiebilanz gewinnen, die die Enthalpien der ein- und ausfließenden Stoffströme berücksichtigt. Da sich Wärmestrahlung in ihrem Entropiegehalt von anderen Wärmeströmen unterscheidet, muss diese jeweils getrennt behandelt werden.

Für den Schwebeschmelzofen (s.o.) ergeben sich die konvektiven und konduktiven Wärmeverluste nach eigenen Berechnungen zu etwa 1210 MJ pro Tonne Kupferstein. Genaue Angaben darüber, wie sich der Wärmeverluststrom aus den genannten Anteilen zusammensetzt, sind leider nicht vorhanden. Daher müssen einige Annahmen über die Temperaturverteilung der Außenhülle gemacht werden. Ferner wird die Wärmestrahlung als die eines schwarzen Strahlers betrachtet und angenommen, dass der konvektive Anteil des Wärmeverlustes zu vernachlässigen ist. Damit lässt sich, nach der Theorie des schwarzen Strahlers, eine Strahlungsenergie E_{rad} von etwa 15 MJ pro Tonne Kupferstein berechnen. Nach

¹⁵⁸ Weitere Fehlmengen gehen eventuell auf oxydische Verbindungen der angegebenen Elemente zurück, denn Angaben über den Sauerstoffgehalt fehlen hier

$$S_{rad} = \frac{4}{3} \frac{E_{rad}}{T}$$

ergibt sich damit ein Entropiestrom S_{rad} von $5,40 \times 10^4$ J/K pro Tonne Kupferstein. Der Anteil des Wärmeverlusts, der durch Strahlung erzeugt wird, ist also eher gering, weshalb die Gesamtbilanz nicht allzu sehr von den (eventuell unrealistischen) Annahmen über die Temperatur der Außenhülle abhängt.

Nach den oben gemachten Angaben wird der Rest des Wärmeverlusts, also etwa 1195 MJ, per Wärmeleitung an die Umgebungsluft ($T_0 = 298$ K) abgegeben. Dies entspricht dann nach

$$S_Q = \frac{Q}{T_0}$$

einem Entropiestrom von $4,01 \times 10^6$ J/K pro Tonne Kupferstein. Mit den Strahlungsanteilen beträgt der Entropiestrom der Wärmeverluste dann $4,06 \times 10^6$ J/K pro Tonne. Für den Schwebeschmelzofen ergibt sich dann eine Entropiebilanz wie in Tabelle 9 wiedergegeben.

Tabelle 9_Entropiebilanz des Schwebeschmelzofens für die Produktion von einer Tonne Kupferstein. Die Wärmeverluste beinhalten Leitungs- und Strahlungsverluste. Die Werte wurden nach thermodynamischen Standardquellen berechnet¹⁵⁹.

Input	Entropie [J/K]	Output	Entropie [J/K]
Erzkonzentrat	$1,65 \cdot 10^6$	Kupferstein	$1,90 \cdot 10^6$
Zuschläge	$8,95 \cdot 10^4$	Schlacke	$2,85 \cdot 10^6$
Flugstaub	$7,57 \cdot 10^4$	Abgas /Flugstaub	$1,65 \cdot 10^7$
Konverterschlacke	$6,36 \cdot 10^5$	Wärmeverluste	$4,06 \cdot 10^6$
Luft/ Sauerstoff	$1,19 \cdot 10^7$		
Heizöl	$1,17 \cdot 10^5$		
Erdgas	$3,99 \cdot 10^4$		
Summe	$1,45 \cdot 10^7$	Summe	$2,53 \cdot 10^7$
		Entropieproduktion	$1,08 \cdot 10^7$

7.3.4 Die anderen Prozesse

Analog zu dem oben beschriebenen Vorgehen lassen sich nun auch die anderen Prozesse (Konverter, Anodenofen, Elektrolyse) auf ihre Entropieproduktion hin untersuchen. Die Modellierung der Stoff- und Energieströme wurde dabei auf Daten aus der Literatur aufgebaut und im Dialog mit Experten der NA an die Produktionsverhältnisse bei der NA angepasst¹⁶⁰. Die Stoffstrom-, Energie- und Entropiebilanzen werden im Folgenden

¹⁵⁹ CRC 1996; Barin 1989; Linstrom & Mallard 2001

¹⁶⁰ Original Daten von Biswas & Davenport 1994; Willebrandt 1993; Krüger et al. 1995; Krüger & Rombach 1998; Velten 2000; Kopke 2000; Copper 91; Kippenberger et al. 1998; Goto 1979; Rombach 2000, und MacCain & Floyd 1994 wurden modifiziert, um ein konsistentes Netzwerk von

tabellarisch wiedergegeben¹⁶¹.

Tabelle 10_ Stoff-, Energie- und Entropiebilanz für den Konverterprozess (Peirce-Smith Konverter)

Input			S [J/K]	Output			S [J/K]
Kupferstein (1460 K)	1,46	t	$2,78 \cdot 10^6$	Blisterkupfer (1470 K)	1	t	$1,40 \cdot 10^6$
Zuschläge	0,17	t	$1,43 \cdot 10^5$	Schlacke (1470 K)	0,43	t	$1,02 \cdot 10^6$
Anodenschlacke	0,06	t	$7,69 \cdot 10^4$	Abgas (1023 K)	3073	Nm ³	$3,65 \cdot 10^7$
Kupferschrott	0,16	t	$7,07 \cdot 10^4$	Abgas vom Vorlauf	591	Nm ³	$4,66 \cdot 10^6$
Luft (23,5% O ₂)	992	Nm ³	$7,80 \cdot 10^6$	Wärmestrahlung	90	MJ	} $5,72 \cdot 10^6$
Fremdluft	2626	Nm ³	$2,06 \cdot 10^7$	Abwärme	1635	MJ	
Erdgas	56,5	Nm ³	$6,02 \cdot 10^4$				
el. Energie	20	kWh					
Entropieproduktion [J/K]							$1,77 \cdot 10^7$

Tabelle 11_ Stoff-, Energie- und Entropiebilanz für den Anodenofen

Input			S [J/K]	Output			S [J/K]
Blisterkupfer (1470 K)	1,01	t	$1,51 \cdot 10^6$	Anoden (1470 K)	1	t	$1,37 \cdot 10^6$
Konverterschlacke (1500 K)	0,03	t	$6,96 \cdot 10^4$	Schlacke (1470 K)	0,07	t	$1,87 \cdot 10^5$
Schwerl	0,03	t	$1,07 \cdot 10^5$	Abgas (860 K)	1168	Nm ³	$1,08 \cdot 10^7$
Kupferschrott	0,01	t	$6,96 \cdot 10^3$	Abwärme+Strahlung	1550	MJ	$5,20 \cdot 10^6$
Blasluft	1,3	Nm ³	$1,05 \cdot 10^4$				
Fremdluft	1127	Nm ³	$8,84 \cdot 10^6$				
Erdgas	6,7	Nm ³	$4,93 \cdot 10^4$				
Elektr. Energie	16	kWh					
Entropieproduktion [J/K]							$0,69 \cdot 10^7$

Stoff- und Energieflüssen zu erzielen, siehe Gößling 2001.

¹⁶¹ Die Temperatur der Stoffflüsse wird zu 298,15 K angenommen, wenn nicht in Klammern anders angegeben.

Tabelle 12_ Stoff-, Energie- und Entropiebilanz für die Elektrolyse

Input		S [J/K]	Output		S [J/K]
Anoden	1,199 t	$6,33 \cdot 10^5$	Kathoden	1,0 t	$5,22 \cdot 10^5$
H ₂ SO ₄	2,5 kg	$5,18 \cdot 10^4$	Anodenschrott	0,192 t	$1,01 \cdot 10^5$
Dampf (4bar, 150 °C)	128 kg	$9,60 \cdot 10^5$	Anodenschlamm	6,0 kg	$2,83 \cdot 10^3$
Elektr. Energie	300 kWh		Abwärme und Strahlung	1438 MJ	$4,82 \cdot 10^6$
			Kondens. Wasser	128 kg	$4,97 \cdot 10^5$
			NiSO ₄	4,0 kg	$2,37 \cdot 10^5$
			Entropieproduktion [J/K]		$0,44 \cdot 10^7$

7.4 Entropiebilanz des Gesamtprozesses

Aus den Einzelbilanzen lässt sich nun eine Gesamtbilanz der metallurgischen Kupferherstellung berechnen. Dafür werden die Einzelprozesse hochskaliert und auf das Endergebnis von einer Tonne raffiniertem Kupfer bezogen. Das Ergebnis ist in Tabelle 13 gegeben.

Tabelle 13_ Entropieproduktion der vier Prozesse bezogen auf die Produktion von einer Tonne Kathoden. Die Bedeutung des Entropiekoeffizienten wird im Kap. 7.6 erläutert.

Prozess	Entropieproduktion	Entropiekoeffizient η_e
Schwebeschmelzofen	$(1,92 \cdot 10^7 \pm 10\%) \text{ J/K}$	0,069
Konverter	$(2,14 \cdot 10^7 \pm 25\%) \text{ J/K}$	0,080
Anodenofen	$(0,83 \cdot 10^7 \pm 10\%) \text{ J/K}$	0,006
Elektrolyse	$(0,44 \cdot 10^7 \pm 10\%) \text{ J/K}$	0,002
Summe	$(5,33 \cdot 10^7 \pm 16\%) \text{ J/K}$	

Die Genauigkeit der Werte für die Entropieproduktion lässt sich nur schwer angeben, da unterschiedliche Quellen benutzt wurden, welche größtenteils keine Angaben zu den Unsicherheiten enthalten. Die thermodynamischen Daten sind demgegenüber mit nur kleinen Fehlern behaftet, in der Regel weniger als 1%. Da die Betreiber der Schmelzhütten ihre Daten in der Regel bis auf 10% genau kennen, wird diese Fehlermarge auch hier für die Stoffströme zugrunde gelegt. Eine Ausnahme bildet die Menge an Erdgas für den Konverter, hier lagen die Literaturwerte um bis zu 50% auseinander. Mittels Fehlerfortpflanzung ergeben sich daraus die in Tabelle 10 angegebenen Fehlermargen.

7.5 Sekundärkupferproduktion

Das Recycling von Kupfer hat einen hohen Stellenwert in der Kupferproduktion, insbesondere auch bei der NA. Im Jahre 2000 betrug der Anteil des aus Sekundärrohstoffen hergestellten Reinkupfers weltweit etwa 14%, in einigen Ländern sogar bis zu 62%¹⁶². Die einzelnen Prozesswege des Recyclings sind dabei so verschieden wie die Sekundärmaterialien selbst. In diesem Projekt wurden daher zur Vereinfachung drei Szenarien untersucht, die das Recycling von Kupferschrotten in einer Primärhütte beschreiben. Diese Szenarien sind im Einzelnen

- Recycling von reinen Kupferabfällen, z.B. Anodenreste aus der Elektrolyse, im Anodenofen
- Recycling von PVC-haltigem Kupferschrott, z.B. aus der Kabelzerlegung, im Anodenofen
- Recycling von SiO₂- und PVC-haltigem Kupferschrott, z.B. aus der Elektronikschrottaufbereitung, im Konverter

Interessant ist nun die Frage, inwieweit sich der Ressourcenverbrauch, also die Entropieproduktion, für sekundär erzeugtes Kupfer von Primärkupfer unterscheidet. Die Modellierung der zugehörigen Stoffströme geschah dabei in Form von Variationen vollzogen, als Veränderungen, bzw. „Störungen“ des Produktionssystems ohne Einsatz von Sekundärmaterialien.

7.5.1 Recycling von reinen Kupferabfällen im Anodenofen

Das wohl einfachste Verfahren Kupfer zu rezyklieren ist das Einschmelzen von hochreinen Kupferabfällen, z.B. Kupfergranulat aus der Kabelzerlegung, im Anodenofen. Dieser Verfahrensweg ist bereits in der Beschreibung der Primärproduktion in Kapitel 3 enthalten, denn als einer der Inputs des Anodenofens sind dort Kupferschrotte mit einem Kupferanteil von über 99% ausgewiesen. Interessant ist jetzt, den Anteil des Ressourcenverbrauchs zu bestimmen, der diesem Weg der Kupferverwertung zugeschrieben werden kann. Dies ist ein klassisches Allokationsproblem und kann gelöst werden, wenn man die Entropieproduktion des Prozesses entsprechend dem Anteil am Gesamtkupfereinsatz auf die einfließenden Stoffströme aufteilt. Für den Anodenofen ergibt dies, dass ca. 1,3% der hier erzeugten Entropie durch das Einschmelzen von Kupferschrott entstehen¹⁶³. Nun geht ein Teil des eingesetzten Kupfers in die Schlacke des Anodenofens über, welche dann im Konverter weiterverarbeitet wird. Das gilt auch für den Kupferschrottanteil. Somit gehen weitere 0,02% der Entropieproduktion des Konverters auf das Konto der Kupferschrottverwertung. Analog erhält man für den Schwebeschmelzofen einen Anteil von 0,005% und für die Elektrolyse 1% der jeweiligen Entropieproduktion. Bezieht man diese Ergebnisse auf eine Tonne aus Kupferschrott erzeugte Kathoden, so ergeben sich die in Tabelle 14 angegebenen Werte für die Entropieproduktion.

¹⁶² IPCC 2000

¹⁶³ vgl. Gößling 2001

Tabelle 14_Entropieproduktion pro Tonne Kupferkathoden aus Kupferschrott. Der Kupferanteil des Schrotts wurde zu 100% angenommen und über den Anodenofen der Prozesskette zugeführt.

Prozess	Entropieproduktion
Anodenofen	$(0,81 \cdot 10^7) \text{ J/K}$
Konverter	$(0,03 \cdot 10^7) \text{ J/K}$
Schwebeschmelzofen	$(0,01 \cdot 10^7) \text{ J/K}$
Elektrolyse	$(0,44 \cdot 10^7) \text{ J/K}$
Summe	$(1,29 \cdot 10^7) \text{ J/K}$

7.5.2 Recycling von PVC-haltigem Kupferschrott im Anodenofen

Als zweites Szenario wurde die Verarbeitung von PVC-haltigem Kupferschrott, zum Beispiel verunreinigtes Material aus der Kabelzerlegung, im Anodenofen untersucht. Der PVC-Anteil wird als variabel angenommen und liegt in der Regel zwischen 1 und 20%. Bei gleich bleibendem Schrotteinsatz kann man nun abschätzen, wie der PVC-Anteil die spezifische Entropieproduktion beeinflusst. Unter der Annahme vollständiger Verbrennung kann man die Entropieproduktion durch die Umsetzung von PVC im Anodenofen berechnen¹⁶⁴. Dabei ersetzt das PVC einen Teil des sonst zugeführten Heizöls. Benutzt man wieder den Massenanteil als Allokationsfaktor (wie oben beschrieben), so ergibt sich für einen PVC-Anteil von 10% eine Entropieproduktion von etwa $1,4 \cdot 10^7 \text{ J/K}$ pro Tonne raffiniertes Kupfer, also etwas mehr als die Herstellung aus reinem Kupferschrott, aber deutlich weniger als die Herstellung aus Roherzkonzentraten ($5,33 \cdot 10^7 \text{ J/K}$). Die Abhängigkeit der Entropieproduktion vom PVC-Anteil in diesem Szenario ist in Abbildung 20 zu sehen.

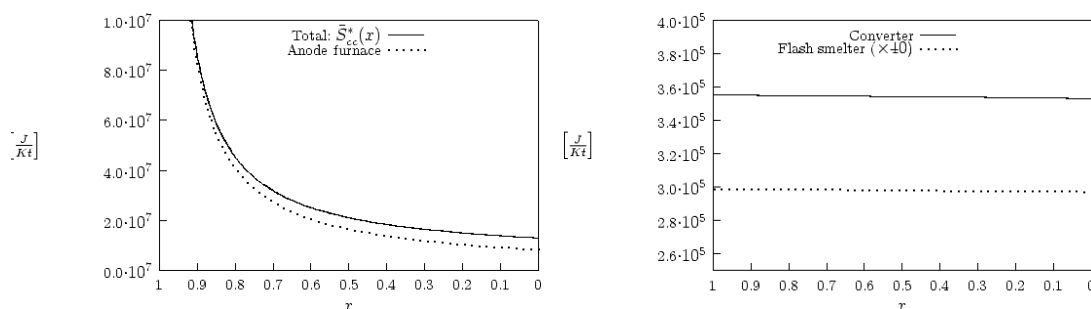


Abbildung 20_ Die durchgezogene Linie in der linken Abbildung zeigt den Verlauf der spezifischen Entropieproduktion für die Herstellung von Kupfer aus PVC-haltigem Schrott bei variablem PVC-Anteil (x-Achse). Die punktierte Linie ist der Anteil des Anodenofens an der Gesamtentropieproduktion. Die rechte Abbildung zeigt den gleichen Verlauf für den Anteil aus Konverter und Schwebeschmelzofen. Der Anteil der Elektrolyse liegt bei konstant $0,44 \cdot 10^7 \text{ J/Kt}$ und wird nicht gezeigt.

¹⁶⁴ vgl. Gößling 2001

7.5.3 Recycling von SiO₂- und PVC-haltigem Kupferschrott im Anodenofen

Ein durchaus realistisches Szenario ist die Verwertung von SiO₂- und PVC-haltigen Kupferschrotten, beispielsweise aus der Elektronikschrott- oder Altautoverwertung. Auch für dieses Szenario wird die Entropieproduktion berechnet indem zunächst die Stoffströme der Primärproduktion angepasst werden, im Sinne einer Variation des gelösten Gleichungssystems. Im Rahmen dieser Anpassung wird auch die Elektrolyseeffizienz r variiert. Dann können die Entropieproduktionen berechnet und auf die Menge an Kupfer bezogen werden, die aus Schrott erzeugt wurde. Interessant ist hier wieder die Frage, wie die Zusammensetzung den Ressourcenverbrauch bestimmt. Dafür wird die Zusammensetzung über die drei Variablen α (Kupfer), β (SiO₂) und γ (PVC) beschrieben. Die Abbildung 21 und die Abbildung 22 zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Ressourcenverbrauchs vom Kupfergehalt, und eine eher schwache Abhängigkeit vom PVC- und SiO₂-Anteil. Dabei hängt es von der Elektrolyseeffizienz ab, wie sich ein hoher SiO₂-, bzw. PVC- Anteil auswirkt. Bei einer hohen Elektrolyseeffizienz ($r \approx 1$) bewirkt ein hoher PVC-Anteil eine erhöhte Entropieproduktion, da im Konverter das PVC keinen Brennstoff ersetzt (dieser Ofen funktioniert energetisch autark), sondern durch die Verbrennung von PVC lediglich zusätzliche Entropie produziert wird. Bei kleiner Elektrolyseeffizienz tritt dieser Effekt in den Hintergrund und ein hoher SiO₂-Anteil bewirkt eine zusätzliche Entropieproduktion im Schwebeschmelzofen (da dort nun mehr Konverterschlacke verarbeitet werden muss). Letztlich ist die Abhängigkeit vom Kupfergehalt jedoch entscheidend für den Ressourcenverbrauch der Schrottverwertung.

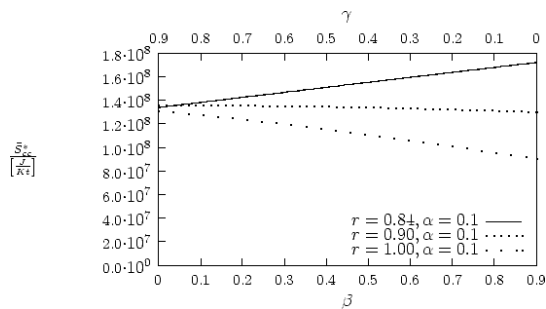


Abbildung 21_ Spezifische Entropieproduktion für die Herstellung von raffiniertem Kupfer aus Schrotten mit unterschiedlichen Zusammensetzungen bei Einsatz im Konverter. Die untere x-Achse zeigt den Kupferanteil (α) des Schrottes, die obere den entsprechenden PVC-Anteil (γ), der SiO₂-Anteil (β) ist hier null. Die durchgezogene Kurve zeigt den Verlauf für eine Elektrolyseeffizienz r von 0,84 (Anoden-Input zu Kathoden-Output), die punktierte Kurve zeigt den Verlauf für $r = 1$.

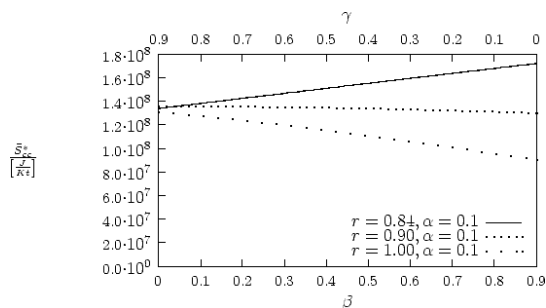


Abbildung 22_ Spezifische Entropieproduktion für die Herstellung von raffiniertem Kupfer aus Schrotten mit unterschiedlichen Zusammensetzungen bei Einsatz im Konverter. Die untere x-Achse zeigt den SiO₂-Anteil (β) des Schrottes, die obere den entsprechenden PVC-Anteil (γ), der Kupfer-Anteil (α) ist hier 10%. Die drei Kurven gelten für verschiedene Elektrolyseeffizienzen r von 0,84 bis 1.

Hier zeigt sich, wie stark eine Sortenreinheit des Schrottes sich auf den Ressourcenverbrauch bei der Verwertung auswirkt. Aus Abbildung 20 geht hervor, dass besonders bei kleinen Kupfergehalten der Ressourcenverbrauch pro Tonne erzeugtes Reinkupfer stark ansteigen kann. Rechnet man die Entropieproduktion in Exergieverlust um (also in Einheiten von verloren gegangener nutzbarer Energie), so erhält man einen Verlust von etwa 18 GJ pro Tonne Kupfer, wenn der Kupfergehalt im Schrott von 50% auf 10% sinkt. Dies entspricht immerhin dem Exergiegehalt von 450 l Heizöl. In einer Lebensweg übergreifenden Betrachtung müsste man nun diesen Ressourcenverbrauch den zusätzlichen Aufwand für Sammlung und Sortierung gegenüber stellen, um zu einer Aussage über die (thermodynamische) Sinnhaftigkeit zu kommen.

Abschließend soll noch ein Vergleich zwischen den beiden möglichen Eintrittspunkten für Kupferschrott in den Produktionsprozess vorgestellt werden. In Tabelle 15 sind die jeweiligen Entropieproduktionen für zwei Szenarien aufgeführt: reinen Kupferschrott im Anodenofen und reinen Kupferschrott im Konverter. Es wird deutlich, dass eine Verarbeitung von Schrott weiter hinten im Prozess sich günstig auf den Ressourcenverbrauch auswirkt, die spezifische Entropieproduktion sinkt auf fast die Hälfte.

Tabelle 15_ Spezifische Entropieproduktion für die Herstellung von Kupfer aus reinem Kupferschrott. Die zweite Spalte bezieht sich auf den Einsatz von Schrott im Anodenofen, die dritte Spalte auf den Einsatz im Konverter.

Prozessschritt	Schrott im Anodenofen		Schrott im Konverter	
Schwebeschmelzofen	0,07	MJ/K	0,00	MJ/K
Konverter	0,35	MJ/K	12,07	MJ/K
Anodenofen	8,13	MJ/K	7,99	MJ/K
Elektrolyse	4,40	MJ/K	4,53	MJ/K
Summe	12,89	MJ/K	24,60	MJ/K

7.6 Diskussion der Ergebnisse

7.6.1 Diskussion der Ergebnisse für die Primärproduktion

Zunächst mal lässt sich die konzentrierende Eigenschaft des beschriebenen Prozessnetzes anhand des Entropiegehalts der Kupfer tragenden Stoffströme ablesen, wenn man diesen Entropiegehalt auf die jeweils enthaltene Menge Kupfer bezieht. Ist dieser Wert im Konzentrat noch 167,6 J/(K mol), so sinkt er auf 33,2 J/(K mol) im Kathodenkupfer. In jedem Prozessschritt sinkt dieser Wert und kann als die eigentliche "Dienstleistung" dieses Prozesses interpretiert werden. Stellt man dieser Erniedrigung der Entropie des wertvollen Stoffstroms die gleichzeitig insgesamt erzeugte Entropie gegenüber, so erhält man ein Maß für die thermodynamische Effizienz der Prozesse. Dieser Wert ist der in Tabelle 8 als η_e bezeichnete Entropiekoeffizient. Man erkennt hier deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Prozessschritten: während der Konverter zwar den größten Anteil an der Gesamtentropieproduktion hat, ist sein Entropiekoeffizient auch am größten, was auf ein hohes Nutzen zu Aufwand Verhältnis schließen lässt. Ganz anders hingegen bei der Elektrolyse: hier ist die "Dienstleistung" eben gering (die Konzentration an Kupfer wird nur um einige Zehntel Prozent erhöht), während die Gesamtentropieproduktion relativ groß ist. Entsprechend klein ist der Entropiekoeffizient. In einer Bilanz des gesamten Lebenswegs von z.B. Kupferkabeln müsste man natürlich die Dienstleistung der Elektrolyse anders bewerten. Schließlich sorgt die hier gewonnene Reinheit für eine deutliche Minderung des elektrischen Widerstandes von Kupferleitungen, was eine deutliche Einsparung von Entropie während der Nutzung zur Folge hat. Man kann leicht abschätzen, dass sich bei dieser Form der Nutzung die durch die Elektrolyse zusätzliche erzeugte Entropie schon nach wenigen Monaten amortisiert hat. Thermodynamisch gesehen ist die Elektrolyse also ein sehr

ineffizienter Prozess, technisch hingegen höchst sinnvoll und derzeit auch ohne Alternative. Die Entropieanalyse zeigt jedoch, dass hier noch viel Spielraum für Innovationen ist.

Ein Großteil der Entropieproduktion des Schwebeschmelzofens und des Konverters lässt sich durch die Umwandlung von chemisch gebundener Energie (Sulfide) in thermische Energie erklären. Dies ist ein prozessbedingtes Phänomen und ließe sich nur umgehen, wenn es gelänge, die Oxidation der Sulfide auf niedrigerem Temperaturniveau, ähnlich einer Brennstoffzelle zu betreiben. Die Umwandlungsenergie ließe sich dann eventuell als elektrische Energie nutzen. Entwicklungen in diese Richtung sind allerdings nicht bekannt. Ein weiterer Hauptgrund für die Entropieproduktion liegt in der Übertragung der Reaktionswärme auf die Abgase. Insbesondere die eindringende Fremdluft (nicht für den Prozess benötigte Luft) sorgt für einen entropischen Verlust durch die damit verbundene Dissipation von Wärmeenergie und Reaktionsgasen. Aus entropischer Sicht ist daher eine bessere Abdichtung dieser Prozesse zu empfehlen.

Speziell der Konverter bringt noch eine weitere Ineffizienz mit sich durch seinen chargenweisen Betrieb. Die Startvorbereitungen, sowie jedes Befüllen und Entleeren bedeuten eine weitere Entropieproduktion durch Einschleusen von Fremdluft und Dissipation von Wärmeenergie. Auch dieser Schwachpunkt ist bereits erkannt. Es laufen Entwicklungen hin zu einem kontinuierlichen Prozess, es sind aber noch einige technische Schwierigkeiten zu überwinden¹⁶⁵.

Bei allen Prozessen ist die Verbrennung von fossilen Brennstoffen ein weiterer Entropieproduzent. Dieser Ressourcenverbrauch lässt sich prinzipiell nicht umgehen, es sei denn durch eine völlig neuartig gestaltete Prozesstechnik (s.o.). Allerdings lässt sich die Entropieproduktion verringern durch bessere Isolierung des Ofenwände oder eine bessere Nutzung der Abwärme aus Abgasen und Strahlung (z.B. zur Vorheizung der Zuschläge, Reaktionsluft, etc.). In gewissem Maße wird das schon praktiziert, die Möglichkeiten sind aber noch nicht ausgereizt.

7.6.2 Diskussion der Recycling-Ergebnisse

Im ersten Szenario (reine Kupferabfälle im Anodenofen) dient der Anodenofen lediglich zum Einschmelzen des Kupferschrotts. Dafür lässt sich auch eine Mindestentropieproduktion berechnen, wenn man annimmt, dass dem Schmelzgut lediglich die nötige Wärmemenge zugefügt werden muss. Es ergibt sich dann für den Schmelzprozess eine Mindestentropie von etwa $0,29 \cdot 10^7$ J/K pro Tonne Kathoden. Vergleicht man dies mit den oben errechneten $0,81 \cdot 10^7$ J/K, so stellt sich dieses Szenario als ungeeignet für das Rezyklieren von hochwertigem Schrott dar. Ist also keine Feuerraffination erforderlich, sollte stattdessen ein anderes Aggregat als Schmelzofen gewählt werden, zum Beispiel ein gasbefuehrter Schachtofen, was in der Regel auch so gemacht wird.

Im zweiten Szenario (PVC-haltiger Kupferschrott) erkennt man eine deutliche Abhängigkeit des Ressourcenverbrauchs vom PVC-Anteil. Für typische PVC-Anteile von 1 bis 20% variiert die Entropieproduktion zwischen $1,30$ und $1,49 \cdot 10^7$ J/K pro Tonne raffiniertes Kupfer, und damit etwas über den Werten für reinen Kupferschrott. Andererseits liegen diese Werte deutlich unter denen für die Gewinnung aus Erzkonzentraten. Betrachtet man also das Recycling von Kupferschrotten aus Sicht des Ressourcenverbrauchs, so bestätigt sich hier die Vermutung der Einsparmöglichkeiten durch Recycling. Für große PVC-Anteile macht dieses Verwertungsszenario natürlich keinen Sinn, wie zum einen an dem divergierenden Ressourcenverbrauch abzulesen ist, was aber auch durch die technischen Schwierigkeiten (z.B. Dioxinbildung) noch verschärft wird. Bei einem PVC-Anteil von nahe 100% wird die Anlage lediglich zum Verbrennen von PVC benutzt, entsprechend muss die spezifische Entropieproduktion (pro Tonne Kupfer) natürlich gegen unendlich gehen.

Beim zweiten und dritten Szenario (SiO₂- und PVC-haltiger Kupferschrott im Konverter) zeigt der Vergleich verschiedener Schrottqualitäten deutlich die Bedeutung der Reinheit von

¹⁶⁵ Krüger o.J.

Kupferschrotten. Bei niedrigen Kupfergehalten (unterhalb 20%) ist diese der entscheidende Faktor für den Ressourcenverbrauch. So verdoppelt sich beispielsweise die Entropieproduktion wenn die Reinheit von 20% auf 10% zurückgeht. Beim Vergleich der letzten beiden Szenarien wird überdies deutlich, dass bei höheren Reinheitsgraden der Einsatzort des Kupferschrotts wichtig ist: je weiter hinten im Prozess, desto geringer ist der Ressourcenverbrauch. Der Ressourcenverbrauch verdoppelt sich hier, wenn der Kupferschrott im Konverter statt im Anodenofen eingesetzt wird. Während diese Folgerungen vielleicht intuitiv klar sein mögen, liegt hier auch ein zahlenmäßiger Beleg vor.

Für die Sammlung und Aufbereitung von Recyclingmaterial ergeben sich damit zwei Einsparpotenziale. Je reiner der Schrott ist, desto geringer fällt der Ressourcenverbrauch bei der Verhüttung aus, da die Prozesse besser ausgenutzt werden. Wie schon oben erwähnt, ist der Unterschied zwischen 50%igem und 10%igem Kupferschrott enorm. Auf der anderen Seite kann ein reinerer Kupferschrott weiter hinten im Prozess eingesetzt werden (im Anodenofen, statt im Konverter), was zu einer weiteren Einsparung beim Ressourcenverbrauch führt. Eine genaue Bewertung der möglichen Einsparungen setzt allerdings die Analyse des Ressourcenverbrauchs der Sammlung und Sortierung voraus. Nur in der Gesamtsicht von Sammlung, Aufbereitung und Verhüttung kann eine Handlungsempfehlung gegeben werden.

7.7 Abschließende Bemerkung

Die oben dargestellten Ergebnisse und Empfehlungen wurden zum Abschluss dieses Teilprojekts mit den Partnern aus der NA diskutiert. Der thermodynamische Ansatz und die Resultate stießen dabei auf reges Interesse, selbst wenn die daraus abgeleiteten Empfehlungen für die Praktiker keine wirklich neuen Erkenntnisse brachten. Die Optimierungsmöglichkeiten des Prozessnetzes sind schließlich in jahrelanger Forschungsarbeit bereits analysiert worden und werden nach und nach ausgeschöpft (inzwischen wurde in der NA ein Energie-Effizienz Projekt abgeschlossen, welches den Energieverbrauch um über 20% senken konnte). Dennoch bestätigten die Ergebnisse aus der Entropie-Analyse diese bekannten Ansatzpunkte für eine Optimierung. Für die weitere Methodenentwicklung bleibt festzuhalten, dass hier die Realisierbarkeit einer genauen thermodynamischen Analyse gezeigt und die Anforderungen an die Datenbasis deutlich gemacht werden konnten.

8 Nachhaltiger Stahlkreislauf - Die Rolle des Kupfers als Störelement

8.1 Hintergrund

Der Nachhaltigkeitsdiskurs bezüglich nicht erneuerbarer endlicher Ressourcen ist stark auf die Aspekte "Schonung der natürlichen Primärressourcen" (effiziente Nutzung), "Verringerung von Materialverlusten" (hohe Rückführungsrate gebrauchter Ressourcen) sowie auf einen Übergang von quantitativer zu qualitativer Entwicklung fokussiert. Die Betrachtung des Stahlkreislaufs lenkt den Blick auf einen weiteren wesentlichen Bereich: den nachhaltigen Umgang mit Sekundärressourcen.

Stahl wird – wie andere Metalle – nicht tatsächlich verbraucht. Er wird vielmehr vom geogenen Erzlager - mit hohem energetischem Aufwand - in das „Lager“ der Nutzungsphase in der Technosphäre überführt (vgl. Abbildung 23). Das dort vorliegende Metall weist aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften eine gute Kreislauffähigkeit auf und seit langer Zeit bestehen funktionierende und stabile Recyclingstrukturen. Ein Austrag aus den Kreislaufstrukturen findet mengenmäßig vor allem durch Korrosion während der Nutzungsphase und durch unvollständige Rückführung in die Recyclingphase statt.

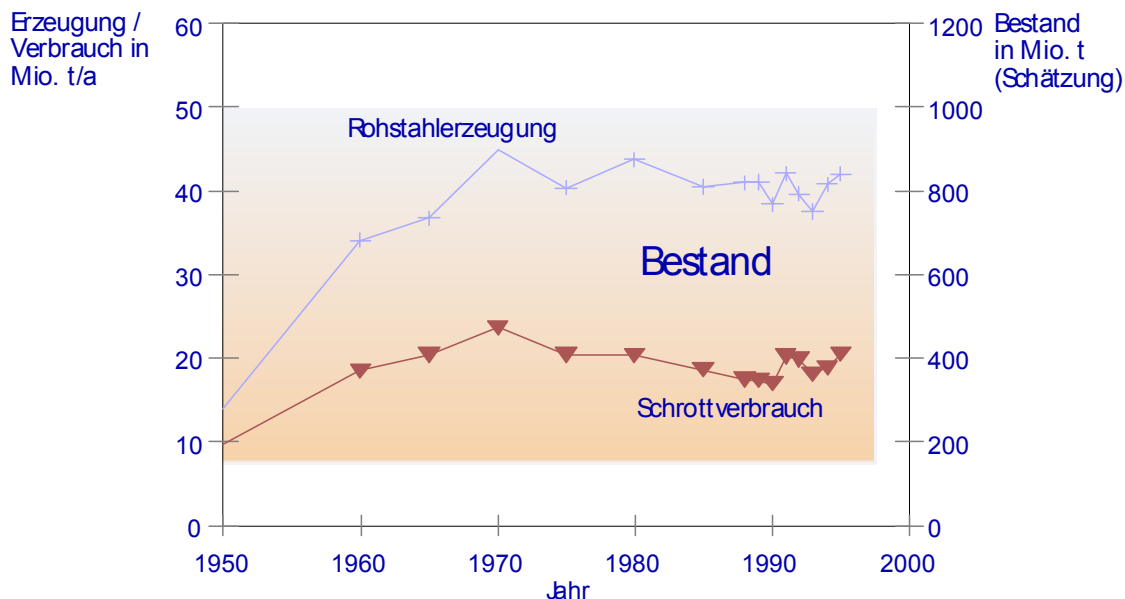


Abbildung 23_ Entwicklung des Stahlbestandes in der Technosphäre der BRD (Schätzung)

Eisenerz wird aufgrund des großen Vorkommens¹⁶⁶ noch relativ lange verfügbar sein. Sinkt jedoch die Reichhaltigkeit der Erze, erhöht sich der Aufwand pro Tonne produzierten Stahls und steigen die ökologischen Belastungen. In den Mittelpunkt der Diskussion um eine nachhaltige Stahlwirtschaft rückt daher unter Ressourcengesichtspunkten - neben den dissipativen Verlusten und dem Ansatz der Verbrauchsverringerung z.B. durch veränderte Nutzungsstrukturen oder Produktgestaltung - die Qualität der Sekundärressource „Stahl“.

¹⁶⁶ So beschreibt der U.S. Geological Survey die Gesamtreserve mit 230 Mrd t, das unter derzeitigen Bedingungen verfügbare Vorkommen mit 71 Mrd t und das zukünftig verfügbare („reserve base“) mit 160 Mrd. t., vgl. USGS 2001

Der im Laufe der Jahrzehnte akkumulierte Bestand von Stahl in der Technosphäre hat mit 600 Millionen bis 1,1 Milliarden Tonnen allein in der BRD inzwischen einen Umfang erreicht, der der Fe-Menge des gesamten Erzvorrats kleinerer Erzeugerländer entspricht¹⁶⁷. Die Bedeutung dieser „Sekundär-Ressource“ im Rahmen des Nachhaltigkeitsdiskurses zeigt sich aber erst dann vollständig, wenn berücksichtigt wird, dass zu dieser Menge als „ökologischer Rucksack“ [Schmidt-Bleek 1994] die gesamten ökologischen Lasten der Überführung aus dem Erz zugerechnet werden müssen. So wird z.B. für die Überführung des Erzes in Primärstahl in Deutschland eine durchschnittliche Energiemenge von ca. 15 GJ/t benötigt. Beim Recycling von Stahl kann auf diesem Grundstock weiter aufgebaut werden. Der Energiebedarf liegt hier bei nur ca. 5 GJ/t. Hinzu kommt, dass für den dynamischsten Bereich der Stahlindustrie – die Sekundärstahlerzeugung (vgl. die Dynamik im Mengenzuwachs des im Elektrostahlwerk erzeugten Rohstahls in Abbildung 24) – der akkumulierte Bestand von Stahl in der Technosphäre die wichtigste Rohstoffgrundlage darstellt.

Von großer Bedeutung ist auch die qualitative Dynamik. Dies wird unter anderem daran deutlich, dass inzwischen zunehmend versucht wird, auch Hochqualitätsprodukte¹⁶⁸ aus Schrott über Sekundärstahlprodukte zu erzeugen, während in der Vergangenheit eher nur begleitstoffreiche Qualitäten über die Sekundärstahlroute hergestellt wurden. Die Möglichkeit, begleitstoffarme Qualitäten herstellen zu können, ist eine wichtige Voraussetzung für eine Ausweitung des „Sekundär“-Stahlanteils an der gesamten Stahlproduktion. Vor allem diese Qualitätsanforderungen bedingen nämlich den hohen Anteil des Stahls, der derzeit noch über die Primärroute hergestellt wird.

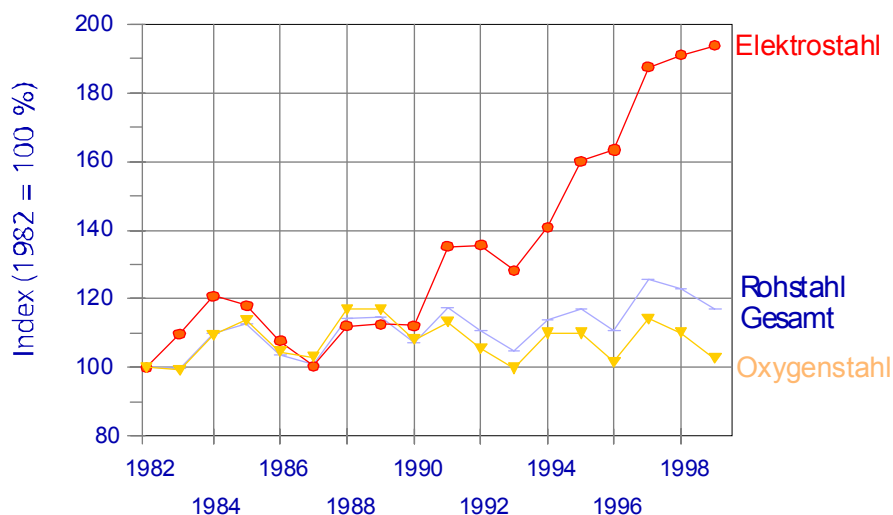
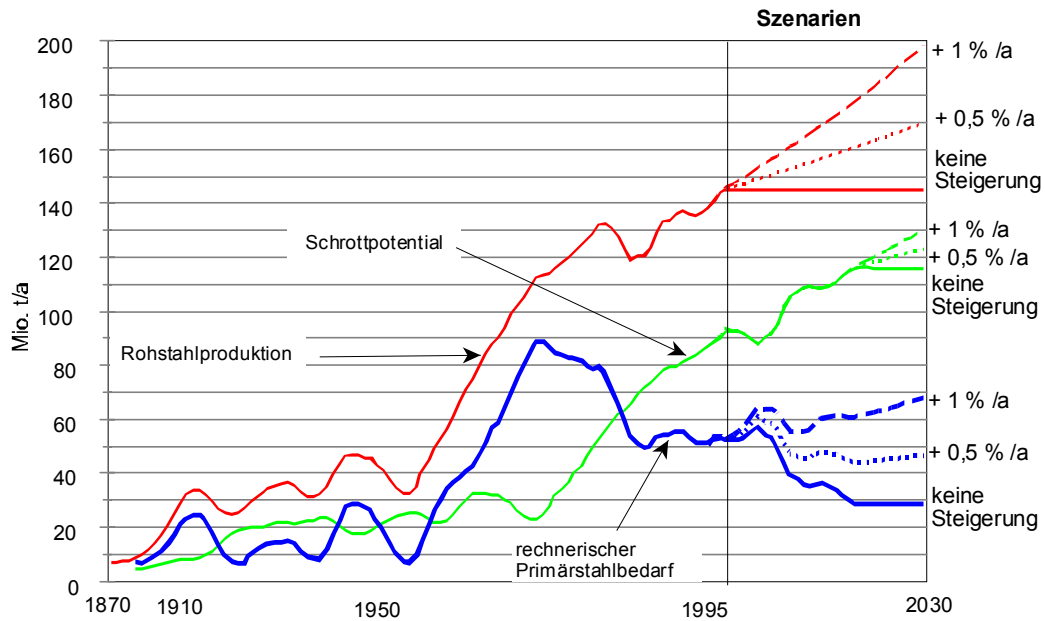


Abbildung 24_ Index der Rohstahlerzeugung in der BRD (1982 = 100)

Absolut gesehen stellt sich natürlich auch die Frage der Mengenverfügbarkeit. Der derzeitige Stahlbedarf lässt keine vollständige Deckung durch Schrott zu. Dies gilt allerdings nur unter Beibehaltung der aktuellen Zuwachsraten des Stahlbedarfs. Eine Verringerung der Zuwachsraten, z.B. durch qualitätsbezogene statt quantitätsbezogene Entwicklungen, würde die Lücke zwischen Schrottangebot und Stahlbedarf („scrap-gap“) reduzieren. Der Umfang dieser Lücke wird – neben den Verlusten durch Korrosion und unvollständiger Rückführung – vor allem durch den Nachlauf aufgrund der langen Lebensdauer mengenrelevanter Stahlprodukte bedingt (siehe Abbildung 25).

¹⁶⁷ Der Bestand ist nicht zu verwechseln mit dem „Lagerbestand“ bei den Unternehmen der Stahl-Recyclingwirtschaft von ca. 2 Mio.t, wie er z.B. vom Statistischen Bundesamt (Außenstelle Düsseldorf) dargestellt wird.

¹⁶⁸ Vgl. Birat, Baillet 1999



Setzungen:
 Produktnutzungsdauer: \approx 20 Jahre
 Stahlverlust durch Korrosion und unvollständige Rückführung 20 % to 30 %

Abbildung 25_ Szenarien zum Verhältnis Stahlbedarf und Schrottangebot

In einer nachhaltigen Stahlwirtschaft kommt daher dem sorgsamem Umgang mit der Qualität der Sekundärressource eine hohe Bedeutung zu.

Die Verformungseigenschaften von Rohstahl und die Qualität von Stahlprodukten werden unter anderem durch den Gehalt an Störelementen bestimmt. So führen z.B. Kupfer in der Stahlschmelze zu Warmbrüchigkeit, Phosphor und Schwefel zu Oberflächendefekten, Stickstoff, Phosphor und Schwefel zu verschlechterter Verformbarkeit und Stickstoff, Phosphor und Wasserstoff zu Versprödung.

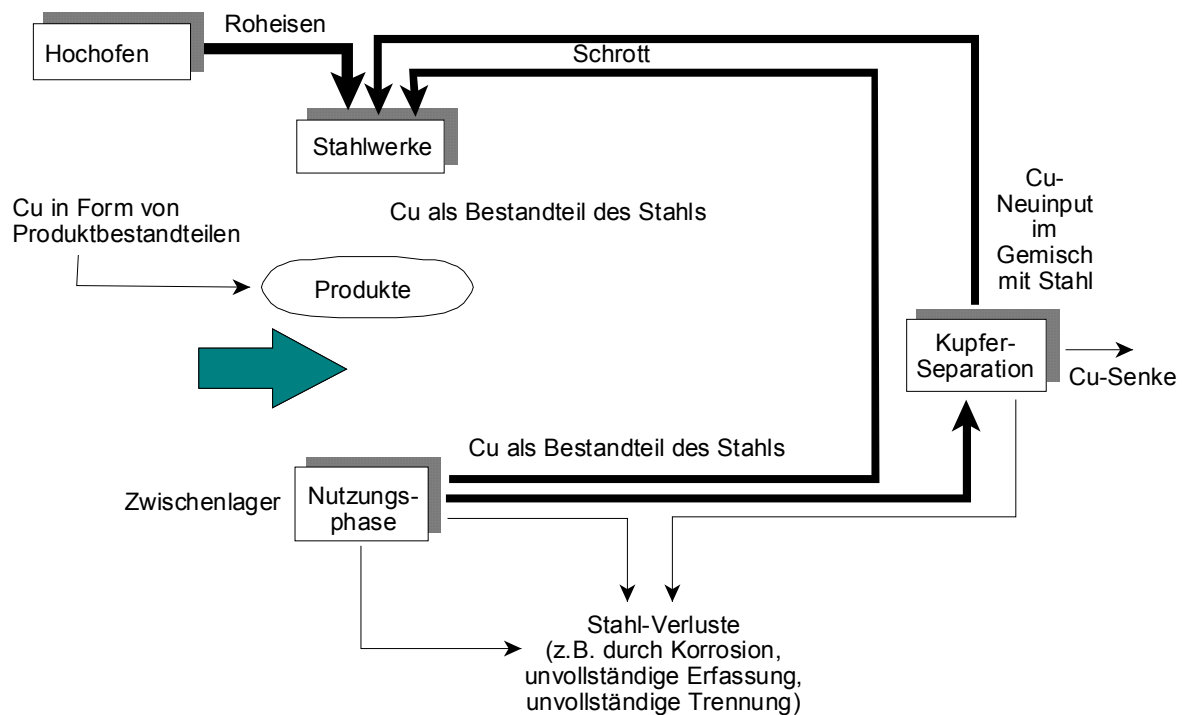


Abbildung 26_ Vereinfachte Darstellung des Stahlkreislaufs

Einige metallische Verunreinigungen, wie z.B. Kupfer, haben weit reichende Konsequenzen, da sie aus dem Stahl nicht wieder abtrennbar sind, wenn sie erst einmal darin „gelöst“ sind. Es wurden zwar immer wieder technische Möglichkeiten, z.B. für eine Entkupferung der Stahlschmelze untersucht und im Labormaßstab aufgezeigt¹⁶⁹. Eine Überführung in den großtechnischen Maßstab ist jedoch bisher nicht gelungen und schon aus ökonomischen Gründen derzeit nicht absehbar. Es besteht somit die Tendenz, dass sich Kupfer im Stahlkreislauf anreichert und so die Qualität der Ressource Schrott durch zunehmende Verunreinigung beeinträchtigt.

In verschiedenen Simulationen wurde die Entwicklung der Kupfergehalte prognostiziert. So erwarten Yamada et al.¹⁷⁰ für Japan einen Anstieg um das 1,2- bis 1,5-fache im Betrachtungszeitraum von 1985 bis 2020 und eine (in der Simulation kumulierte) durch Verunreinigung unverwertbare¹⁷¹ Schrottmenge von 200 bis 420 Mio. Tonnen (siehe Abbildung 27). Abbildung 28 zeigt eine nach Schrottsorten differenzierte Simulation für Europa¹⁷².

¹⁶⁹ Vgl. Savov, Jahnke, Vogel 2004

¹⁷⁰ Yamada et al o. J.

¹⁷¹ „Unverwertbar“ bedeutet hier, dass der Schrott in den bestehenden Produktionsstrukturen und beim derzeitigen Produktmarkt nicht genutzt werden kann.

¹⁷² IISI 2000, p. 51

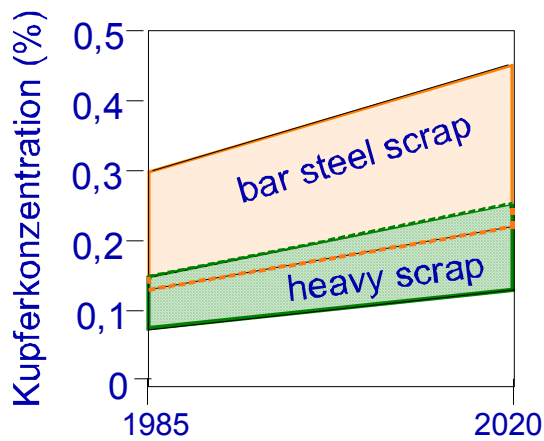
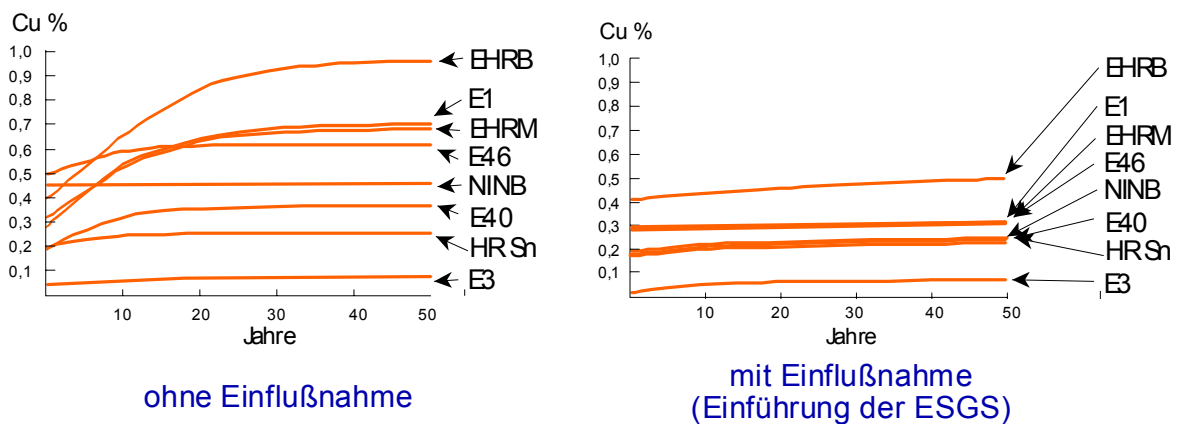


Abbildung 27_Prognose der Entwicklung der Kupfergehalte in zwei Schrottqualitäten [Yamada et al. O.J.]



Quelle: IISI (HG): EAF Technology, 2000, S: 51

Abbildung 28_Prognose der Kupfergehalte in verschiedenen Schrottsorten [IISI 2000]

Dabei ist das Wissen über die Kupferproblematik im Stahl keineswegs neu. Schon seit den 70er Jahren ist das Thema regelmäßig Gegenstand von Veröffentlichungen und Bestandteil metallurgischer Vorlesungen, ohne dass dies zu durchgreifenden Konsequenzen geführt hätte. Noch kann die Problematik durch ‚Verdünnung‘ mit Neustahl hinausgeschoben werden.

8.2 Kupfer im Auto

Die Automobilindustrie stellt zu großen Teilen sehr hohe Reinheitsanforderungen an die verwendeten Stahlqualitäten zur Herstellung der Fahrzeuge. Tiefziehbleche, wie sie im Karosseriebau verwendet werden, müssen z.B. einen sehr niedrigen Kupfergehalt aufweisen. In ihre Herstellung gehen daher nur relativ geringe Schrottanteile ein. Diese Schrotte sind zudem in der Regel Fabrikschrotte und damit sehr hochwertig. Andererseits enthält ein derzeit hergestelltes Auto, je nach Typ, 11 bis 25 kg Kupfer in den verschiedensten Anwendungen (Anteil durchschnittlich 2 %). Dabei ist sowohl ein Trend in Richtung auf zentrale – relativ gut abtrennbare - Kabelstränge als auch zur Diversifizierung der Stromverbraucher und damit zur Verteilung des Kupfers über das gesamte Auto festzustellen (vgl. Abbildung 29).

- Elektromotoren
- Achsschenkelbuchsen
- Pumpen
- Gleitlager in Lenkgetrieben
- Verriegelungen
- Gleitleisten
- elektrische Kontakte
- Lagerbuchsen
- Generator, Lichtmaschine
- Synchronringe
- Halbleitermontagerahmen
- Ventilführungsbuchsen
- Kabelbaum
- Lüfter, Gebläse
- Kugellagerkäfige
- Startermotor
- Ladeluftkühler
- Steuergeräte, Relais
- Schaltgabeln
- Zündspule
- Wärmetausche
- Zentralelektrik
- Öl-/Wasserkühler
- Bremsbeläge
- Kontaktfedern
- Brennstoff- / Öl- / Bremsleitungen
- Stechverbindungen
- Drehteile wie z.B. Vergaserdüsen
Zylinderschlösser

Abbildung 29_ Kupferanwendungen im Automobilbau (Beispiele)

Die Gesamtmasse und Verteilung des Kupfers unterscheiden sich stark nach Fahrzeugklasse und Ausstattung. Abbildung 30 beschreibt Beispiele für besonders „kupferintensive“ elektrische und elektronische Anwendungen.

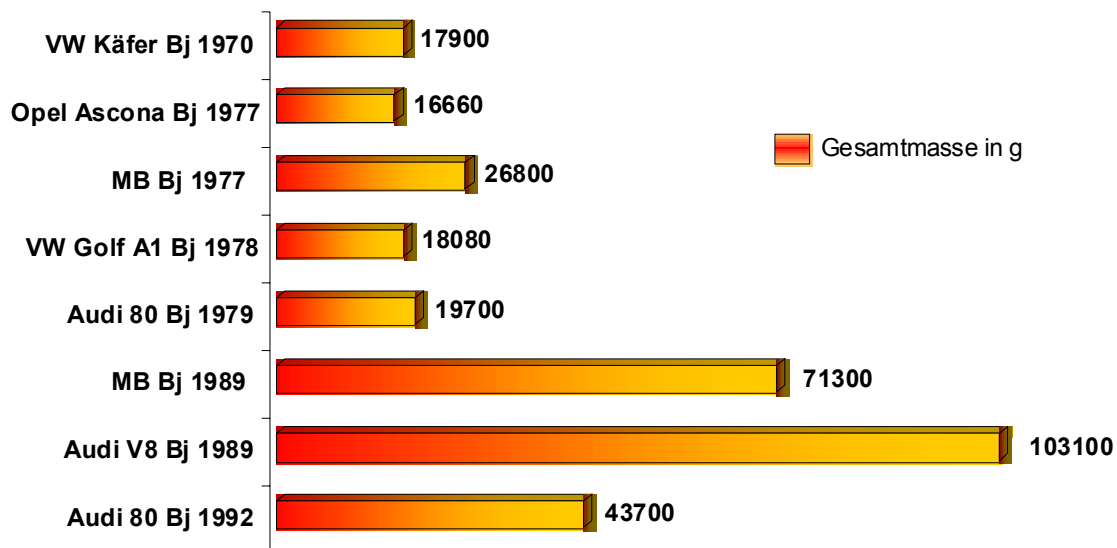


Abbildung 30_ Kupfermengen in ausgewählten Anwendungen im Auto (Beispiele) (Schmidt 2001)

Generell kann festgestellt werden, dass sich bei älteren Kleinwagen hohe Kupferanteile in wenigen Komponenten lokalisieren. In moderneren Mittel- und Oberklassefahrzeugen verteilen sich die Kupfermengen vielfältiger (siehe Abbildung 31 und Abbildung 32).

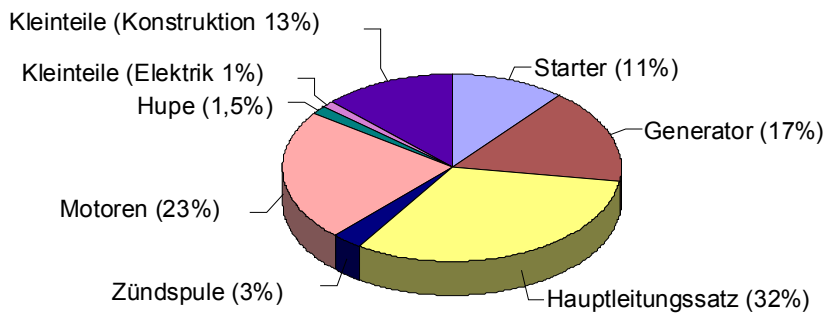


Abbildung 31_ Verteilung von Kupfer in Mittelklassefahrzeugen

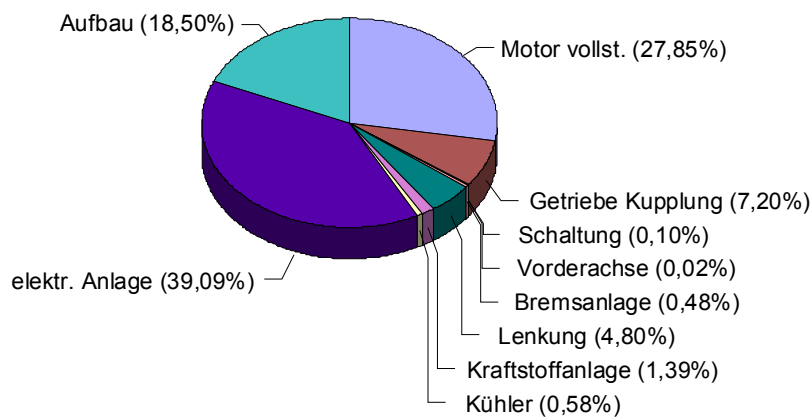


Abbildung 32_ Verteilung von Kupfer in Kleinfahrzeugen

Insbesondere bei Stellmotoren sind sehr deutliche Veränderungen festzustellen. So enthalten moderne Oberklassenfahrzeuge in Extremfällen bis zu 70 Stellmotoren und immer verzweigtere Kabelbäume. Diese müssen die zunehmende Anzahl verteilter Stromverbraucher bedienen. Abbildung 33 beschreibt exemplarisch Anwendungsgebiete von Stellmotoren.

- Scheibenwischermotor
- Fensterhebermotor
- Schiebedachmotor
- Fondsitzverstellmotor
- Motor für Umwälzpumpe / Standheizung
- Antennenantriebsmotor
- Stellantriebe für Heizung, Klimaregelung, Leuchtweitenregelung, Waschwasserpumpe
- Türschließmotor
- Heckklappenschließmotor
- Zentralverriegelungsmotor
- Heckwischer
- Spiegelverstellantrieb
- Motor für Benzinpumpe
- Klappscheinwerfermotor
- Gurtbringermotor oder passives Gurtsystem
- Scheinwerferreinigungsmotor
- Sitzverstellmotor
- Lenkradverstellmotor
- Kopfstützenverstellmotor
- Niveauregulierungsmotor
- Lehnenverstellmotor
- ABS-Motor
- Motorkühlgebläse

Abbildung 33_ Beispiele für die Anwendung von Stellmotoren im Auto

8.3 Situation und technische Handlungsoptionen im Akteursnetz "Auto"

Der „Stahlkreislauf“ besteht aus einem komplexen Netz unterschiedlicher Akteursebenen, denen wiederum eine unterschiedliche Bandbreite von Verhaltensoptionen zur Verfügung steht. Als exemplarische Verdeutlichung wurde im Projekt der Bereich Fahrzeugherstellung und -entsorgung näher betrachtet, da Altautos eine wichtige Quelle des bundesdeutschen Schrottaufkommens darstellen¹⁷³.

8.3.1 Produktionsebene / Automobilhersteller

Der Kupfereintrag aus Altfahrzeugen¹⁷⁴ in den Stahlkreislauf kann herstellerseitig dadurch beeinflusst werden, dass dem Kupferaspekt bei der recyclingorientierten Konstruktion des Neufahrzeugs ein hoher Stellenwert zukommt. Mögliche Ansatzpunkte sind hier

- die einfache Entnehmbarkeit wichtiger kupferhaltiger Teile,
- eine verbesserte Trennbarkeit der Verbindung zwischen Kupfer und Stahl während der Entsorgung,
- die Substitution von Kupfer z.B. durch Aluminium oder Glasfaser,
- die Verringerung der Kupfermenge in Kabeln z.B. durch Bustechnik.

Im Anforderungsgeflecht bei der Konstruktion von Automobilen führen Zielkonflikte (z.B. Platzfragen, Kosten) jedoch in der Praxis zu wesentlichen Umsetzungshemmnissen.

8.3.2 Separationsschritte

Für die Trennung von Kupfer und Stahl aus **Altautos** stehen in der aktuellen Praxis zwei Ebenen zur Verfügung, die in der Regel hintereinander geschaltet werden: die Demontage und der Shredder.

Die **Demontage** kupferhaltiger Bauteile erfolgt in Demontagebetrieben fast ausschließlich händisch und ist damit arbeits- und kostenintensiv.

Nach Russo (1998) können bei Kleinwagen (vor allem älteren Baujahres) signifikante (d.h. den Kupfergehalt der Stahlschmelze deutlich senkende) Kupfermengen durch die Demontage des Antriebsstranges erfasst werden (siehe Abbildung 34).

¹⁷³ Zwar liegen genaue Mengenangaben aufgrund eines unvollständigen Monitorings derzeit (noch) nicht vor. Über unterschiedliche Annäherungen kann die Menge jedoch mit 700.000 t bis 1 Mio. t pro Jahr abgeschätzt werden (vgl. Sander, Lohse, Wulf-Schnabel 1999; sowie: ARGE-Altauto 2000 und: Sander, Lohse 2000)

¹⁷⁴ Als Altfahrzeuge werden entsprechend Altfahrzeug-Gesetz und Altfahrzeug-Richtlinie alle Autos bezeichnet, die entsorgt werden.

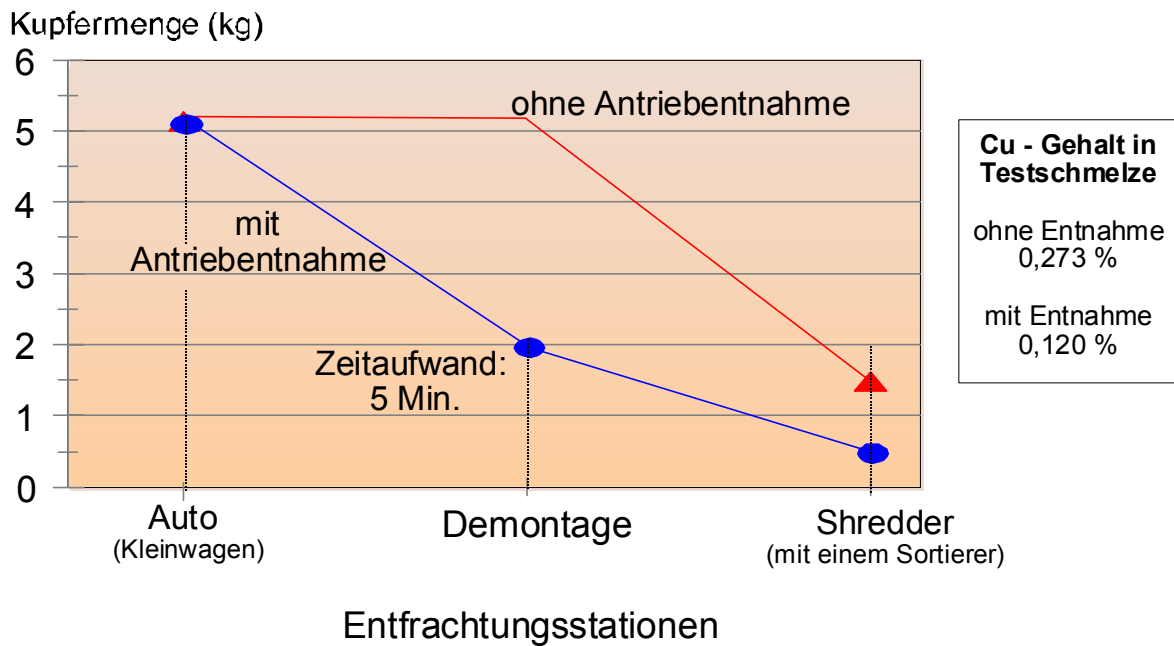


Abbildung 34_ Kupferentfrachtung von Alautos [Russo 1998]

Wesentliche Kupfermengen, die durch eine Volldemontage erfasst werden müssten, sind in den für die Grundfunktionen eines Autos notwendigen Einrichtungen (z.B. Lichtmaschine, Anlasser, Scheibenwischer und Beleuchtung) sowie zunehmend in den Komfortausstattungen wie Klimaanlage, Schiebedach, Audiosysteme, Navigationssysteme, Zentralverriegelung etc. zu finden. Aber auch wichtige Sicherheitseinrichtungen gehören hierzu, wie z.B. ABS, Airbag, Steuerungseinheiten für Xenon - Lampen und die damit verbundenen Scheinwerfer-Reinigungseinrichtungen, elektrische Leuchtweitenregelung usw. Elektrische Fensterheber und Spiegelverstellung gehören mehr und mehr zur Standardausstattung; Kopfstützen werden elektrisch verstellbar angeboten, und sogar Rückspiegel sind mit ihrer automatischen Ablendung elektronische high-tech Bauteile. Ein Ende dieser Entwicklung, die eine Kupfererfassung bei der Demontage mit immer höheren Kosten verbindet, ist nicht absehbar.

Technisch gesehen wäre eine vollständige Demontage des Kupfers aus den Autos möglich. Sie wird im Wesentlichen durch das Kosten/Erlös- bzw. das Kosten/Nutzen-Verhältnis begrenzt. Dabei ist zu beachten, dass der tatsächliche Aufwand nicht unerheblich durch Prozessmaterialien und -teile beeinflusst wird: Für die Entnahme des zentralen Kabelstrangs müssen z.B. oftmals vorher Sitze und hintere Sitzbank entfernt werden.

Das **Shreddern** von Altkarosserien ist heute die bedeutendste Station zur Abtrennung von Kupfer in der Recyclingkette. Schon mit den derzeit genutzten Anlagenkonfigurationen können hohe Entfrachtungsraten erreicht werden.

[Russo 1998] fand in Versuchen heraus, dass bei ansonsten gleich bleibenden Rahmenbedingungen der Kupfergehalt im Shredderschrott aus Kleinwagen, der ohne besondere Maßnahmen bei 0,27 % lag, gesenkt werden kann (siehe auch Abbildung 34) :

- durch die Entnahme des Motors auf 0,12 %,
- durch Nachsortierung am Band durch 3 Personen auf 0,11 %,
- und durch intensivere Demontage auf 0,08 %.

Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der Kupfergehalte im Schrott stellt die Klassifizierung des Shredderschrotts nach Größe dar. Die Versuche von [Russo 1998] bestätigen die Ergebnisse anderer Veröffentlichungen, wonach Kupfer vor allem in kleineren Schrottteilen akkumuliert wird. Russo weist jedoch auch darauf hin, dass für die so separierten kupferreichen Fraktionen (bei einem Siebschnitt von <40 mm waren es in den

genannten Versuchen für Kleinfahrzeuge 20 % des Output) andere Verwertungswege gefunden werden müssen.

8.3.3 Stahlwerk

Auf der Ebene der technischen und ökonomischen Handlungsmöglichkeiten der Stahlwerke wurden und werden eine Reihe unterschiedlicher Ansätze verfolgt. Savov 2001¹⁷⁵ beschreibt als wesentliche Ansätze:

Tabelle 16_ Ansätze zur Kupferentfernung aus Stahlschmelzen

Ansatz		Anmerkungen
Bevorzugtes Erschmelzen	Unterschied zwischen den Schmelzpunkten Fe (1536°C), Cu (1083°C) Kupfer fließt ab, Stahl bleibt im festen Zustand	Adhesion von Kupfertropfen auf Eisenoberflächen bei 1100°C Besseres Abfließen beim Magnetit in Vergleich zum Wüstit
Extraktion in einem NE-Metallbad (Blei, Aluminium)	Eintauchen des Schrottes im Bad, Kupfer löst sich in das NE-Metall, Eisen ist unlöslich.	Pb:1000 kg Blei für 1 t Stahlschrott Al: T = 690 - 950°C, 80% Entfernung in 20 min
Entkupferung mit schwefelhaltigen Schlacken		4 kg Schlacke pro 1 t Schrott zur Senkung des Gehalts von 0,3% Cu auf 0,1% Cu
Behandlung von festem Schrott mit chlorhaltigen Gasen	Gasmischung 27% HCl + 74% Luft, Temperatur 600 – 900°C; Kupfer verdampft als CuCl ₂	verschiedene Versuche: 40% des Ausgangskupfergehalts entfernt in 30 min; 93% in 60 min 74% Cu entfernt in 90 min mit 11% HCl + 89% Luft Gasmischung 10% Cl ₂ + 90% O ₂ T = 927°C
Entkupferung durch Vakuumdestillation	Trennung von Stoffen aufgrund der Dampfdruckunterschiede	Versuchsanlage Schutzgas Argon, Druck der Gasphase 0,01 – 1,0 mbar, Temperatur: 1400 - 1600°C

Die bisherigen Versuche haben allerdings deutlich gemacht, dass den Stahlwerken derzeit keine ökonomisch darstellbaren und großtechnisch realisierbaren Möglichkeiten zur Kupferentfrachtung zur Verfügung stehen.

Die Betreiber von Elektrostahlwerken sind insofern gezwungen, mit den Begleitelementgehalten so umzugehen, dass trotzdem möglichst qualitativ hochwertige Produkte erzeugt werden können. Die Erzeugung von Qualitätsstahl auf Schrottbasis ist derzeit noch vorwiegend auf die Verdünnung mit „reinem“ Primärmaterial, wie Roheisen, Eisenschwamm oder Neuschrotte angewiesen. Um diese Situation zu illustrieren und realisierte Handlungsoptionen zu beschreiben, soll an dieser Stelle auf die Praxis des in der Region angesiedelten Projektpartners ISPAT Hamburger Stahlwerke GmbH sowie der Georgsmarienhütte GmbH detaillierter eingegangen werden.

8.3.3.1 ISPAT Hamburger Stahlwerke GmbH

Die ISPAT Hamburger Stahlwerke GmbH (IHSW) stellen unter den Elektrostahlwerken einen Sonderfall dar. Sie sind das einzige Werk in Westeuropa, das eine Direktreduktionsanlage betreibt und somit über große Mengen des hochreinen Rohstoffs Eisenschwamm verfügt. Das Werk gehört mit einem jährlichen Schrottbedarf von ca. 740.000 Tonnen zu den größten Stahlrecycling-Unternehmen Deutschlands. Bei IHSW wurden im Jahr 2000 im Durchschnitt für die Produktion von insgesamt 1 Mio. t Stahl neben der genannten Schrottmenge 420.000

¹⁷⁵ Savov, Janke, Vogel 2004

t Eisenschwamm eingesetzt.

Zur Gründungszeit wurden bei den Hamburger Stahlwerken ausschließlich Massenstähle für den lokalen Markt produziert. Durch die Einführung diverser qualitätsverbessernder Technologien haben sich die IHSW zu einem bedeutenden Qualitätsstahlerzeuger entwickelt. Heute bieten die IHSW neben Massenstählen u. a. eine breite Palette von Qualitätsstählen mit Cu-Gehalten von max. 0,1 % an. Hierzu gehören Hartstähle, Kaltstauchgüten, Schweißdrähte sowie weiche und extra weiche Stähle für Ziehanwendungen. In Abbildung 35 sind die Anteile der jeweiligen Qualitätsgruppen am Gesamterzeugungsprogramm dargestellt. Die Ausdrücke in Klammern geben den spezifizierten Cu-Gehalt des jeweiligen Erzeugungssegmentes an. Der Kupfergehalt wird dabei repräsentativ für alle Begleitelemente als Qualitätskriterium für das Stahlprodukt und somit auch für den Stahlschrott als Einsatzstoff aufgeführt.

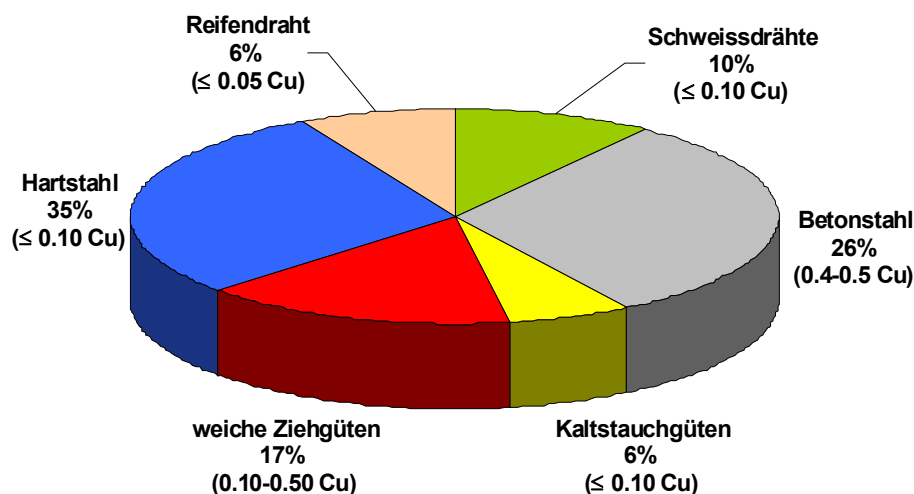


Abbildung 35_ Produkte der ISPAT HSW und ihre Anteile (ISPAT HSW 2001)

Für das ansonsten nur von integrierten Hüttenwerken bedienbare Segment der Qualitätsstähle (bei IHSW ca. 55%) wurden im Durchschnitt etwa 50 % Eisenschwamm eingesetzt. Somit wurden hierfür ca. 325.000 t Schrott verbraucht. Die Erzeugung dieser Menge über die Hochofen- und Konverter-Route mit einem Schrottanteil von ca. 16% hätte eine Rückführung von nur 100.000 t in dieses Stahlsegment bedeutet.

Die vergleichsweise hohe Schrottreyclingrate im Qualitätsstahlbereich wird dadurch ermöglicht, dass über den Einsatz von Eisenschwamm der über den Schrott eingebrachte Gehalt an Störelementen verdünnt werden kann. Dieses Verfahren versetzt IHSW in die Lage, große Mengen Qualitätsstahl zu erzeugen und dabei sogar minderwertigere Schrotte einzusetzen. Darüber hinaus kann eine große Flexibilität bei der Einsatzplanung erreicht werden.

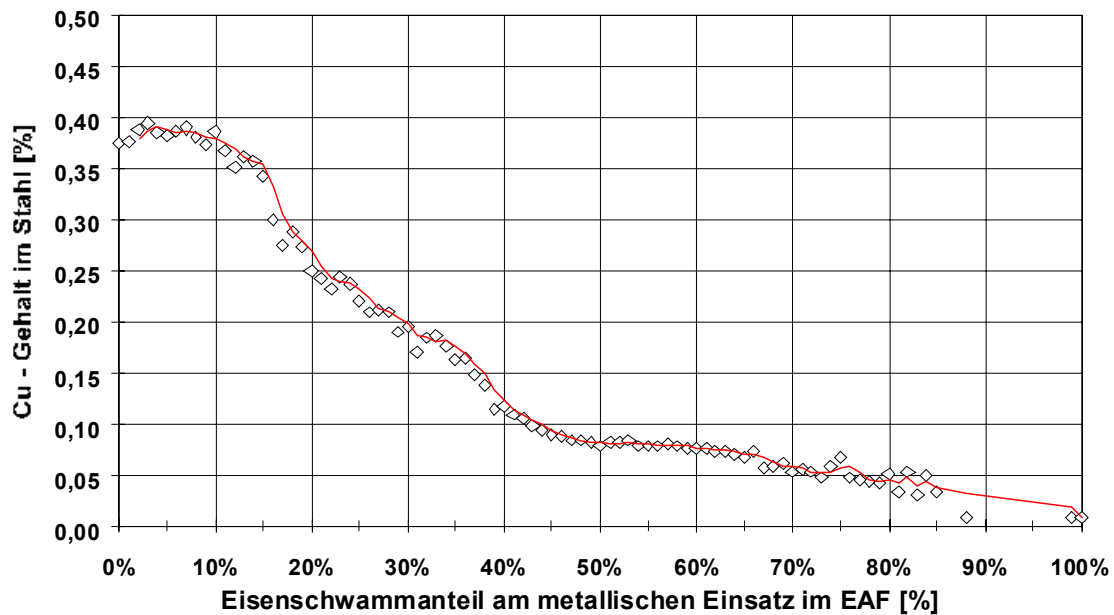


Abbildung 36_ Verhältnis von Eisenschwammanteil und Cu-Gehalt im Stahl bei der ISPAT HSW [ISPAT HSW 2001]

Abbildung 36 verdeutlicht den Verdünnungseffekt des Eisenschwamms. Das Bild zeigt den Kupfergehalt im Stahl als Funktion des Eisenschwammanteils am Einsatz. Die Kurve verläuft nicht linear. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Schrottgattierung in den verschiedenen Kupfergruppen aus Kostengründen verschieden ist.

Je nach Analyse, müssen die verschiedenen Schrottsorten so gemixt werden, dass einerseits die Spurenelementevorschrift eingehalten wird und andererseits die Rohstoffkosten minimiert werden. Mit steigenden Anforderungen hinsichtlich des Begleitelementgehaltes wird der Anteil an höherwertigem Schrott und Eisenschwamm erhöht.

Tabelle 17 gibt einen Überblick über den Anteil der einzelnen Schrottsorten am metallischen Einsatz, den jeweiligen bei IHSW erfahrungsgemäß zu erwartenden Kupferanteil sowie das kalkulierte Ausbringen. So wurden im Jahr 2000 ca. 59 % Schrott und 41 % Eisenschwamm eingesetzt. Der Anteil Eigenschrott am Schrotteinsatz lag bei 8 %, der Neuschrottanteil bei 45 %; ebenso hoch war der Anteil an Altschrott, wobei 27 % auf den schweren Altschrott, Sorte E3, entfielen. Der Schrott enthielt im Mittel 0,25 % Kupfer. Durch den eingesetzten Eisenschwamm wurde der Cu-Gehalt im metallischen Gesamteinsatz auf 0,15 % reduziert.

Tabelle 17_ Metallischer Einsatz bei IHSW in 2000

	Altschrotteinsatz	% CU	Ausbringen (%)
E1	15	0,50	88
E2	5	0,10	92
E3	27	0,30	90
E5	16	0,25	80
S5A	5	0,15	85
E6	19	0,06	91
E40	2	0,27	90
E46	1	1,00	75
E76	3	0,10	80
Fremdschrott	92	0,25	87,9
Eigenschrott	8	0,20	85,3
Schrott gesamt	59	0,25	87,7
Eisenschwamm	41	0,00	85
Summe	100	0,15	86,56

Da die Schrottsorte E8 im Vergleich zu allen anderen Schrotten den geringsten Cu-Gehalt hat, kann diese Sorte teilweise den Eisenschwamm substituieren. Aus diesem Grund können die beiden Einsatzstoffe im Einsatzmix für Qualitätsstähle variiert werden.

Als Beispiel für die Flexibilität bei der Materialeinsatzplanung sind in Tabelle 18 zwei mögliche Gattierungsvarianten für einen Qualitätsstahl mit maximal 0,1 % Cu dargestellt. Es wird deutlich, dass sowohl mit einem E8-Anteil (leichter Neuschrott) von 30 t, als auch mit einem Anteil von 60 t, die gleichen Kupfergehalte im Stahl erreicht werden können, wenn der Eisenschwammanteil entsprechend variiert wird. Diese Anforderungen führen zu zyklischen Schwankungen, denen die Eisenschwammproduktion bei IHSW unterworfen ist: je nach Anteil an zu produzierenden Qualitätsstählen bzw. nach Preis bzw. Verfügbarkeit der Schrottsorte E8.

Entscheidend für die Zuverlässigkeit des Planungsmodells ist eine möglichst gleich bleibende Schrottqualität. Schwankungen im Cu-Gehalt führen bei der Stahlerzeugung zur Überschreitung der geforderten Analysengrenzen und erfordern somit eine Verschiebung im Materialeinsatzmix. Ansteigende Kupfergehalte müssten durch einen Mehrverbrauch reiner Schrottsorten bzw. Eisenschwamm kompensiert werden.

Tabelle 18 Beispiel für zwei Gattierungsvarianten eines Qualitätsstahls

Materialeinsatzplanung																				
Schrottsorten		E 46	E 1	E 1 (P)	E 2	E 3	E 40	E 5	E 5 (G).	E 8	Stw	Ww	Bäre n	E 76	ES	Strompr.	Abstichg.	Ener. Fe	Ener. Schl.	
Schrottpreise	[DM/t]															[DPf/kWh]	[t]	[kWh/t]	[kWh/t]	
Kupfergehalt	[%]	1,00 0,50 0,00 0,10 0,30 0,27 0,25 0,15 0,06 0,50 0,50 0,50 0,10 0,00														135	370	700		
Ausbringen	[%]	75,0	88,0	88,0	92,0	90,0	90,0	80,0	85,0	91,0	93,0	93,0	75,0	80,0	85,0					
Stromverbrauch	[kWh/t _{Eins.}]	452,5	409,6	409,6	396,4	403,0	403,0	436,0	419,5	399,7	393,1	393,1	452,5	436,0	459,5					
Kupfergruppe	Anzahl	E 46	E 1	E 1 (P)	E 2	E 3	E 40	E 5	E 5 (G).	E 8	Stw	Ww	Bäre n	E 76	Schro tt	ES	Cu	Ausbr.	Stromv.	Matkost.
		[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[%/t _{Kn.}]	[%]	[kWh/t _{Kn.}]	[DM/t _{Kn.}]
0,05	1	0	0	0	10	0	0	0	6	32	0	0	2	0	50	106	0,04	86,6		
0,05	1	0	0	0	8	0	0	0	3	51	0	0	0	0	62	93	0,04	87,3		
0,10	1	0	0	0	8	10	0	10	9	30	2	2	2	2	75	81	0,09	86,5		
0,10	1	0	0	0	7	8	0	6	6	60	2	2	2	2	95	59	0,09	87,7		
0,40	0																			
0,50	0																			
Gesamtsumme	4																			
Anteil	[%]																			
Anteil	[kg/t _{Kn.}]																			

Noro et al.¹⁷⁶ prognostizieren für besonders hochwertiges altes Schwerschrott einen Anstieg im Kupfergehalt um den Faktor 1,7 innerhalb der nächsten 20 Jahre. Eine gesicherte quantitative Aussage zur Entwicklung der Kupfergehalte im Altschrott ist aufgrund dessen relativ starken Inhomogenität allerdings schwierig. Untersuchungen der IHSW zur Entwicklung des Cu-Gehaltes, der bei IHSW am häufigsten verwendeten Altschrottsorte (E3) bestätigt allerdings diese Tendenz (siehe Abbildung 37) wenn auch auf höherem Niveau. Das Qualitätsniveau des neuen Stahlschrottes (E8), scheint hingegen relativ stabil zu bleiben.

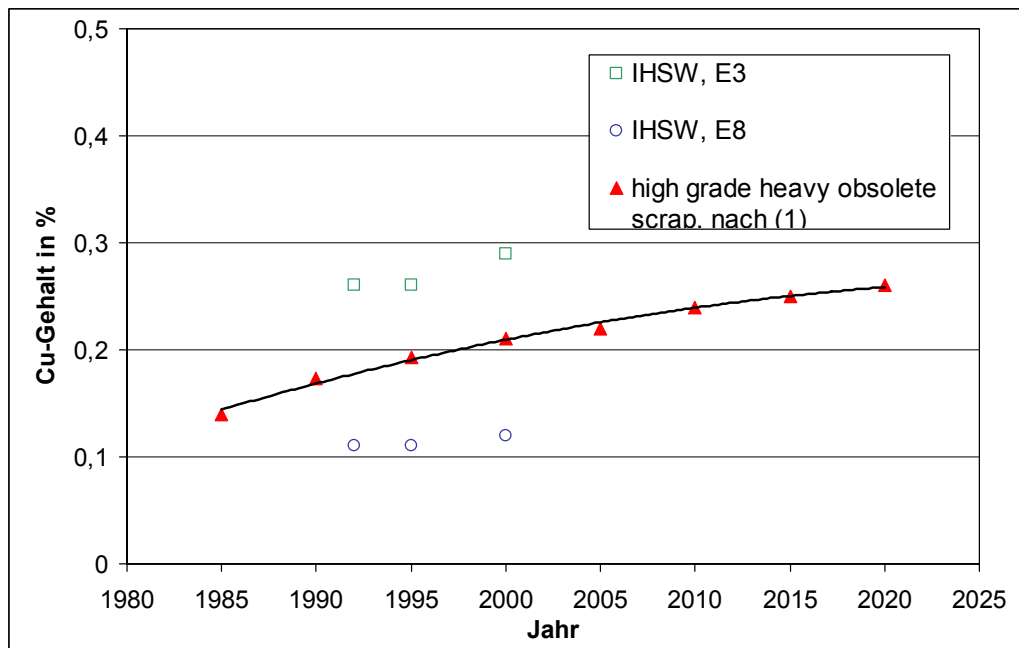


Abbildung 37_ Entwicklung und Prognose der Cu-Gehalte in verschiedenen Schrottsorten der ISPAT HSW [ISPAT HSW 2001]

Steigende Cu-Gehalte im Altschrott sind zum einen auf steigende Kupfergehalte im Stahl selbst zurückzuführen, zum anderen auf Verunreinigungen des Schrottes durch NE-Metalle als Folge unzureichender Aufbereitung und mangelnde Sortenreinheit. Dementsprechend könnte durch eine verbesserte Aufbereitung des Schrottes der stetigen Zunahme des Kupfergehaltes im Altschrott, zumindest teilweise, gegengesteuert werden.

8.3.3.2 Georgsmarienhütte GmbH

In der Georgsmarienhütte GmbH (GMH) werden unlegierte und legierte Baustähle aus verschiedenen Fe-Trägern erschmolzen.

Für die Georgsmarienhütte stellt der Cu-Gehalt im Schrott eine beherrschbare Größe dar. Durch gezielte Schrottmenüs und deren Verfeinerung können sichere Cu-Werte eingestellt werden, wobei Ausreißer durch gute Aufbereitung und Eingangskontrolle vermieden werden müssen. Die größten Unsicherheiten liegen im Bereich der Altschrotte und seit einiger Zeit bei den Neuschrotten im Bereich der Konstruktionsstähle. Nachträgliche Reaktionen auf zu hohe Kupfereinläufe sind schwierig, da sie den Betriebsablauf empfindlich stören. Auch weiterhin wird es eine Gratwanderung zwischen Analysensicherheit und Einsatzkosten geben.

Wichtig für Betriebsablauf und Sequenzplanung ist eine hohe Treffsicherheit bei der

¹⁷⁶ ISIJ International VOL. 37 1997

Bestimmung der Begleitelemente. Da die Schrottsorten mit niedrigen Begleitelementen teurer und oft als solche auch nicht in ausreichendem Maße verfügbar sind, muss durch einen gezielten Sortenmix der Einlaufgehalt der Störstoffe bei Kostenoptimierung sicher gestellt werden. Durch laufende Regressionsrechnungen werden diese Spurenelementgehalte nachgehalten.

Die durchschnittlichen Kupfergehalte der bei der GMH eingesetzten Schrottsorten sind in der folgenden Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19_ Schrottsorten und Kupfergehalte bei der GMH GmbH

	Cu	Standardabweichung
Schrottsorte	[%]	[%]
REB	0,02	0,04
So1	0,40	0,06
So3	0,22	0,03
So8	0,11	0,04
So61	0,05	0,02
So5	0,25	0,05
Bären	0,18	0,12
WW	0,18	0,03
Cr	0,18	0,03
CrMo	0,18	0,03
CrNi	0,18	0,03
CrNiMo	0,18	0,03

Zielwerte bestimmter Spurenelemente wurden in Schrottmenüs zusammengefasst, bei welchen Cu das Leitelement ist. Die Untergruppierungen in den einzelnen Schrottmenüs erfolgten durch zusätzliche Restriktionen (z. B. max. Werte von Ni) oder durch gezielten Einsatz von legierten Schrotten. Hier wird ein großer Aufwand bei dem Rücklaufschrott getrieben, um Legierungselemente gezielt zurückführen zu können. Tabelle 20 zeigt die Zusammenfassung der Schrottmenüs.

Tabelle 20 Schrottmönü bei der GMH GmbH [pers.com. GMH GmbH]

	Cu MAX	Restriktionen	REB	So1	So3	So8	So61	So5	Bären	WW	Cr	CrMo	CrNi	CrNiMo	Summe
Menü	[%]		[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]
11-13	0,10	Unleg / 10 Ni / 15 Ni	18		10	54	55								137
14-16	0,10	15 P / 10 u. 15 Ni mit 15 P	12		10	59	55								136
21	0,15	Un legiert	12		25	48	30	7	7	10					138
22	0,15	10 Ni	12		45	49	31								137
23	0,15	15 Ni	12		35	49	30	11							137
24	0,15	15 P	6		31	50	31	9		10					136
25	0,15	15 P u. 10 Ni	6		46	54	30								136
26	0,15	15 P u. 15 Ni	6		36	55	31	9							136
31	0,20	Un legiert	12	7	35	29	15	15	7	19					139
32	0,20	10 Ni	12	10	36	48	31								137
33	0,20	15 Ni	11	8	56	34	18	10							138
34	0,20	15 P	6	10	35	32	13	16		24					136
35	0,20	15 P u. 10 Ni	6	10	36	54	30								136
36	0,20	15 P u. 15 Ni	6	9	56	37	19	9							137
37	0,20	legiert (Cr)	11	5	24	29	10	15	6		37				138
38	0,20	legiert (CrMo)	12	5	24	29	10	14	7			36			138
39	0,20	legiert (CrNiMo)	11	5	25	29	10	14	7				37		138
41	0,25	Un legiert	11	20	34	24		20	6	24					139
42	0,25	10 Ni	12	10	36	49	30								137
43	0,25	15 Ni	11	15	53	29	19	10							138
44	0,25	15 P	6	21	51	20		18		23					137
45	0,25	15 P u. 10 Ni	6	10	36	54	30								136
46	0,25	15 P u. 15 Ni	6	15	53	33	19	10							137
47	0,25	legiert (Cr)	11	20	35	5		24	6		38				139
48	0,25	legiert (CrMo)	11	20	34	5		25	6			37			139
49	0,25	legiert (CrNiMo)	11	20	35	5		23	7				38		139

Zur Überprüfung der errechneten Kupfer-Ist-Werte und der Soll-Werte werden regelmäßig Nachrechnungen durchgeführt, die exemplarisch in Tabelle 21 dargestellt sind.

Tabelle 21_Kupfergehalte in Abhängigkeit vom Schrottmenü und durchschnittliche Ist-Gehalte der Schmelzen in 2000 [pers.com. GMH GmbH]

Kupfergehalt				
Menü	Cu Max	Ist-Wert	Stabw	Cu Soll
	[%]	[%]	[%]	[%]
15	0,10	0,07	0,02	0,09
21	0,15	0,13	0,02	0,12
22	0,15	0,11	0,03	0,13
23	0,15	0,12	0,03	0,13
24	0,15	0,12	0,02	0,13
26	0,15	0,11	0,02	0,13
31	0,20	0,15	0,03	0,17
32	0,20	0,11	0,03	0,14
33	0,20	0,14	0,03	0,17
34	0,20	0,16	0,02	0,18
36	0,20	0,14	0,03	0,17
37	0,20	0,15	0,02	0,17
38	0,20	0,14	0,02	0,16
39	0,20	0,15	0,02	0,17
41	0,25	0,18	0,03	0,21
42	0,25	0,11	0,03	0,14
43	0,25	0,15	0,03	0,18
44	0,25	0,17	0,03	0,22
46	0,25	0,16	0,03	0,18
47	0,25	0,18	0,03	0,22
48	0,25	0,18	0,04	0,22
49	0,25	0,18	0,03	0,22

Parallel führt die Mannschaft vor Ort eine Regelkarte, um bei Ausreißerchargen sofort mit anderen Schrottsorten gegensteuern zu können (vgl. Abbildung 38).

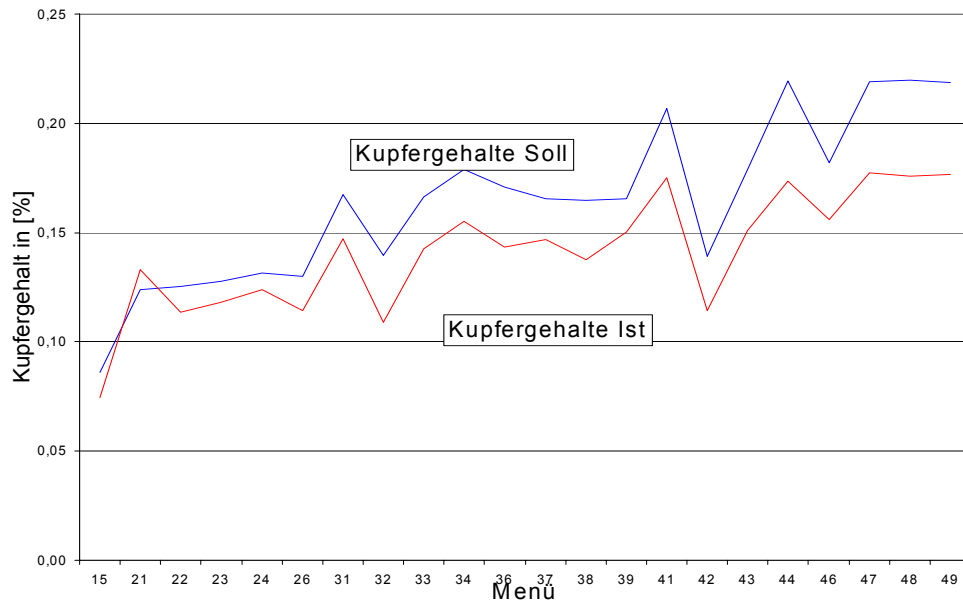


Abbildung 38_Vergleich der SOLL- und IST -Kupfergehalte bei der GMH [GMH 2001]

8.4 Zwischenfazit

Die Darstellungen für die Bereiche Herstellung von Endprodukten, Demontage von Altprodukten und Herstellung von Sekundärstahl können sehr wohl individuelle technische Handlungsmöglichkeiten deutlich machen, insbesondere auf den Stufen Automobilhersteller, Demontage und Schredder. Derzeit werden sie jedoch in den bestehenden Konstellationen aufgrund von Ausweichmöglichkeiten und fehlenden Preissignalen nicht realisiert.

Die beiden exemplarischen Darstellungen der Handlungsoptionen in Stahlwerken, bei denen aktuell der größte Handlungsdruck herrscht, zeigen, dass die Stahlwerke verschiedene technische und organisatorische Wege entwickelt haben, mit Störelementen umzugehen. Deutlich wird aber auch, dass steigende Störelementgehalte zu zunehmend aufwendigeren Maßnahmen der Gegensteuerung führen und das Problem nicht eigentlich gelöst wird, sondern vor allem die Verdünnung als Ausweg genutzt wird.

8.5 Einflussfaktoren im Handlungsfeld

Die folgenden Kapitel gehen auf die Einflussfaktoren ein, die im Akteursnetz „Auto und Stahlkreislaufs“ wirken. Da den Stahlwerken, wie dargestellt, keine dauerhafte Lösungsoption zur Verfügung steht, sondern lediglich kurzfristige Problemschärfungen, wird auf diese nicht weiter eingegangen.

8.5.1 Automobilhersteller

Die Berücksichtigung der beschriebenen Kupferproblematik bei der Konstruktion von Neufahrzeugen wird bei Automobilherstellern vor allem durch das vielfältige Anforderungsgeflecht in der Fahrzeugentwicklung (siehe Abbildung 39), ökonomische Faktoren und Normen mit Auswirkungen im Bereich der recyclingorientierten Konstruktion beeinflusst.

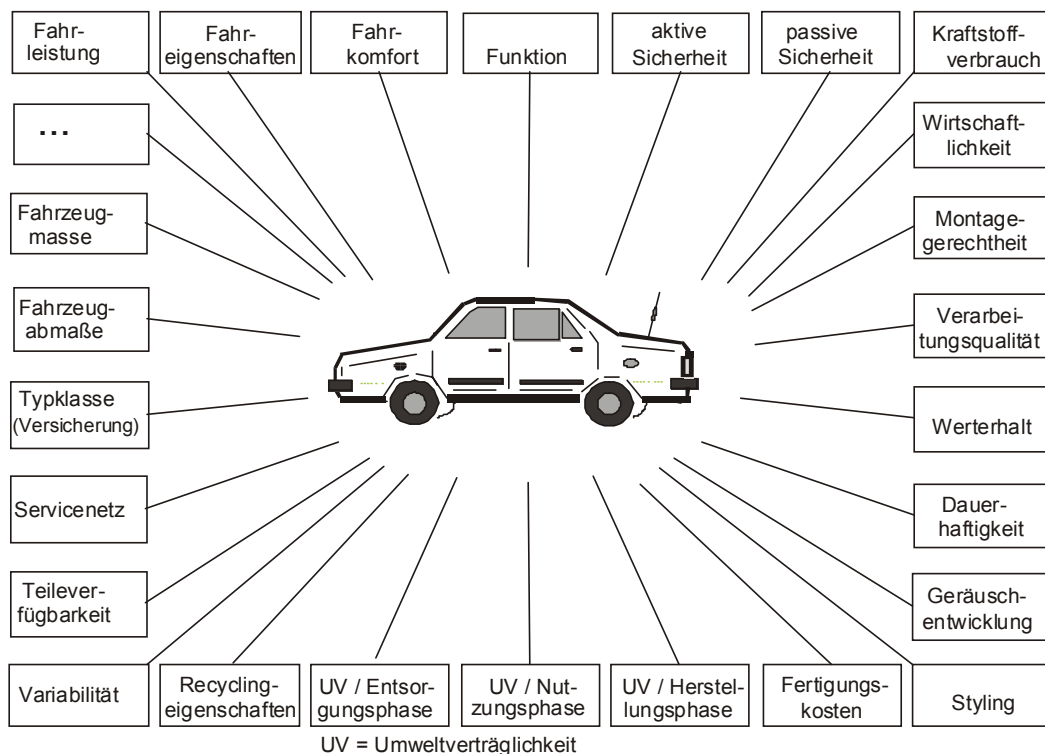


Abbildung 39_Einflussfaktoren bei der Konstruktion von Autos [VW 2000]

Derzeit führt keiner der genannten Einflussfaktoren dazu, dass der Kupferproblematik eine so weit erhöhte Priorität eingeräumt wird, dass sich daraus eine wesentliche Problementlastung für die Stahlkreisläufe ergeben könnte.

Eine mögliche Veränderung dieser Situation könnte sich durch die Altfahrzeugrichtlinie (ELVD) und ihre nationale Umsetzung ergeben. Zwar enthält die ELVD und das inzwischen verabschiedete Altfahrzeug-Gesetz der BRD (AFG) keine *direkten* Anforderungen hinsichtlich die Kupferproblematik. Zukünftig wird jedoch entsprechend Art. 5.4 der Hersteller die gesamten bzw. zumindest einen wesentlichen Teil der Kosten der Altfahrzeugentsorgung übernehmen müssen. Im deutschen Altfahrzeug-Gesetz (AFG) ist die volle Kostentragungspflicht der Hersteller festgeschrieben (Art. 3, § 3).

Zurzeit spielt Frage der Kupferentfrachtung im Hinblick auf die Erlössituation bei Restkarossen für den Demontagebetrieb noch kaum eine Rolle. Sollte zukünftig eine Situation entstehen, in der für kupferentfrachtete Restkarossen höhere Erlöse erzielt werden, als für nicht entfrachtete, könnte sich als Rückwirkung entlang der Wertschöpfungskette auch ein Anreiz ergeben, der Kupferfrage bei der Konstruktion einen höheren Stellenwert zuzuordnen. Zwar werden die Gesamt-Demontagekosten durch eine Vielzahl von Faktoren bestimmt, von denen die ggf. veränderten Erlöse für Restkarossen nur einen geringen Teil ausmachen. Die große Zahl der Altfahrzeuge, gerade der Massenhersteller von Fahrzeugen, die nur zu einem relativ geringen Anteil schon vor der Entsorgung als Gebrauchtwagen exportiert werden (z.B. VW und Opel im Unterschied zu BMW und Daimler-Chrysler), kann jedoch für den Hersteller in der Gesamtkostenkalkulation durchaus relevant werden.

Voraussetzung für eine entsprechende Wirksamkeit ist die differenzierte Kostenzuordnung zum jeweiligen Hersteller, wie sie im deutschen AFG realisiert ist und ein direktes Abrechnungsverhältnis zwischen Demontagebetrieb und Automobilhersteller. Wie dies in anderen Mitgliedsstaaten umgesetzt werden wird, ist derzeit noch unklar. Die Wirksamkeit in Richtung einer verstärkten Berücksichtigung des Kupferproblems bei der Konstruktion von Fahrzeugen wäre sicher deutlich geringer, wenn nur in wenigen Mitgliedsstaaten derartige Systeme mit direkter Wirkung realisiert würden.

Ein zweiter Einflussfaktor könnte sich indirekt aus den Verwertungszielen der ELVD bzw. des AFG ergeben. So gibt es bei einigen Herstellern Überlegungen, die Shredderleichtfraktion (SLF) im Hochofen einzusetzen und damit auf der Grundlage der Regelungen im AFG die stofflichen Verwertungsquoten zu erfüllen. Hierzu müssen die Kupfergehalte im Kunststoffgranulat, das im Hochofen eingesetzt werden soll sehr niedrig sein. Derzeit werden Untersuchungen durchgeführt, ob die angestrebten Konzentrationen von Cu in der SLF am besten durch Demontage oder durch mechanische Separationsschritte erreicht werden können.

8.5.2 Demontage

Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Kupferdemontage im Demontagebetrieb darf nicht nur der Kupfer-Erlös beachtet werden, sondern auch die Wirkung der Kupferdemontage auf den Shreddererlös: Was ausgebaut wird, kann nicht mehr als Gewicht der Restkarosse verkauft werden. Bei der Erlösgestaltung für die Restkarosserie ist auch die Philosophie des Shredders zu beachten, dessen Technologie bzw. mögliche anschließende Handseparierungen ebenfalls die Entfernung von Kupfer ermöglichen.

Der Kupferpreis selbst ist stark vom jeweiligen Dollarkurs abhängig. Das hat zur Konsequenz, dass demontiertes Kupfer bei starkem Dollar exportiert wird. Aktuell liegen die Erlöse für Kupferkabel mit Litzen und Steckern ab Demontagebetrieb bei rund 450 €/t, für Anlasser-/Lichtmaschinenschrott bei ca. 150 €/t.

Durch die Entnahme des Antriebsstranges kann schon einmal eine relevante Menge Kupfer unter wirtschaftlich tragbaren Bedingungen entnommen werden, da die Erlöse für separierten Motoren- bzw. Getriebeschrott höher liegen, als für Shreddervormaterial (siehe Abbildung 40).

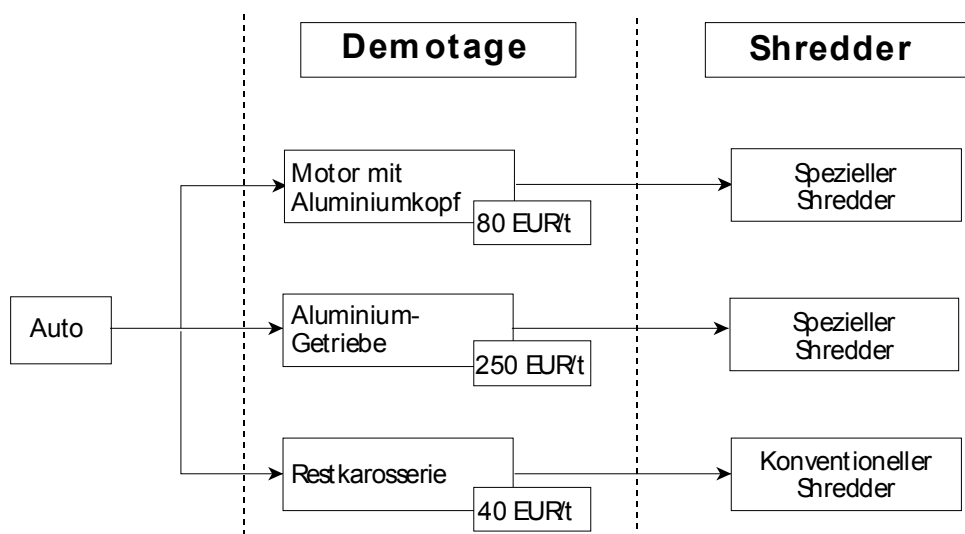


Abbildung 40_Erlössituation für demontierte Altautokomponenten [Knode 2000 pers.com.]

Als Grundregel für die Entnahme von Materialien gilt, dass sich mit zunehmender Demontagetiefe der Quotient Masse/Zeit als Maß für Wirtschaftlichkeit verschlechtert.

Tabelle 22 zeigt ein Rechenexempel für die Demontage eines Anlassers und einer Lichtmaschine. Dabei ist die Demontage der Lichtmaschine relativ schnell durchzuführen, die des Anlassers ist zeitaufwendiger. Die erste Reihe beschreibt die reale Situation, die folgenden Zeilen Bedingungen, unter denen die Demontage ökonomisch tragfähig würde.

Tabelle 22_ Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Lichtmaschine- und Anlasserdemontage (Beispielszenarien); [Knode, Retek GmbH pers. Com]

Gewicht (kg/Bauteil)	Demontagezeit (Minuten/ Bauteil)	Arbeitskosten (€/Std)	Arbeitskosten (€/Bauteil)	Erlös (€/t)	Erlös (€/Bauteil)	Fehlbetrag (€/Bauteil)
9	10	45	7,5	150	1,35	-6,15
9	1,8	45	1,35	150	1,35	0,00
10	5	30	2,5	250	2,50	0,00

Die Betrachtung zeigt, dass erst bei einer sehr starker Reduzierung der Demontagezeiten von derzeit 10 Minuten auf (nicht erreichbare) 1,8 Minuten eine wirtschaftliche Demontage von Lichtmaschine und Anlasser möglich würde. Bei gering erhöhtem Gewicht der Bauteile, wie dies bei neueren Fahrzeugen der Fall ist, und geringeren Arbeitskosten (€/Std) ist ein Erlös möglich, wenn pro t Lichtmaschine bzw. Anlasser 250 € erlöst werden könnten, was aber im Moment nicht realistisch ist. Die Erlössituation könnte zudem verbessert werden, wenn die Einnahmen für die entfrachtete Karosserie höher wären, als für die nicht entfrachtete.

Die Demontage des Kabelbaums wird, wie schon erwähnt, durch die immer verzweigtere Verteilung der Verbraucher im Auto zunehmend schwieriger. Das Rechenbeispiel in der Tabelle 23 macht deutlich, dass unter derzeitigen Bedingungen (d.h. mit Fahrzeugen, die zu Beginn der 90er Jahre zugelassen wurden) eine Volldemontage nicht wirtschaftlich realisierbar ist und auch bei einer 60%igen Erfassung des Kabelstrangs nur rentabel gearbeitet werden kann, wenn die Arbeitskosten verringert und der Erlös für den Kabelstrang oder für die entfrachtete Karosserie gesteigert werden könnten.

Tabelle 23_ Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Kabelbaumdemontage [Knode, Retek GmbH pers. Com]

Erfassungsgrad	Gewicht (kg/Bauteil)	Demontagezeit (Minuten/ Bauteil)	Arbeitskosten (€/Std)	Arbeitskosten (€/Bauteil)	Erlös (€/t)	Erlös/ Bauteil (€/Bauteil)	Fehlbetrag (€/Bauteil)
80 Gew.% Erfassung	15	20	45	15	450	6,75	-8,25
60 Gew.% Erfassung	11,25	10	45	7,5	450	5,06	-2,44
	11,25	10	33,5	5,58	500	5,63	0,04

Schmidt (2001) beschreibt, dass eine wirtschaftliche Demontage des Bordnetzes unter Berücksichtigung von Vordemontagezeiten erst oberhalb eines Kupferpreises von ca. 1.000 €/t gegeben ist (siehe Abbildung 41).

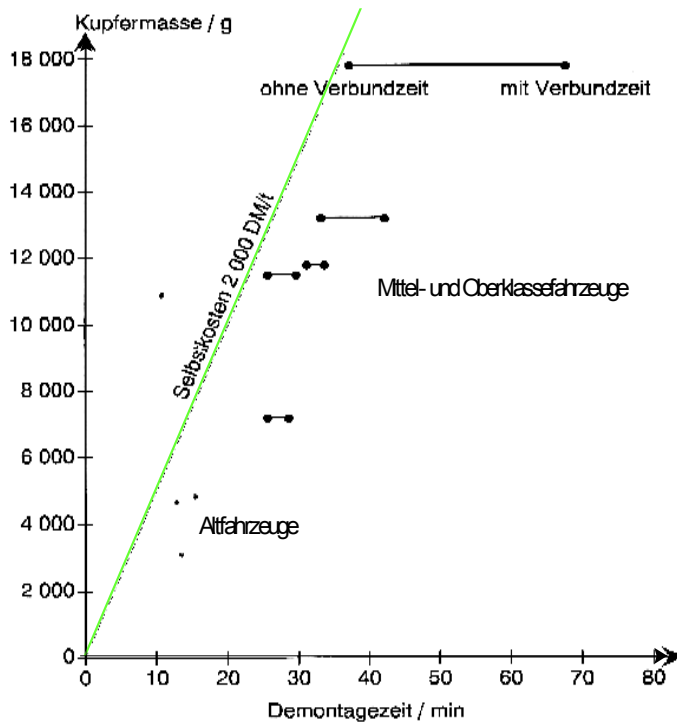


Abbildung 41_Ökonomie der Demontage [Schmidt 2001]

Ordnungsrechtliche Anforderungen an die Kupferentfrachtung von Altfahrzeugen z.B. im Rahmen der EU-Altautorichtlinie bzw. ihrer nationalen Umsetzung bestehen derzeit nicht, so dass eine Finanzierung über eine erweiterte Produktverantwortung nicht erfolgt (eine Ausnahme bilden hier möglicherweise zukünftig die in Kapitel 8.5.1 beschriebenen indirekten Wirkungen der Altfahrzeugrichtlinie, die zu verstärkten auch akteursübergreifenden Eingriffen der Produzenten führen könnten).

8.5.3 Shredder

Russo (1998) untersuchte neben der Effizienz verschiedener Maßnahmen zur Kupferseparation auch deren Kosten- bzw. Erlössituation. Er betrachtete dabei sowohl das Zusammenspiel zwischen Demontage und Shredder (drei unterschiedliche Demontagegrade), als auch die mechanische Größenklassen-Sortierung und die manuelle Separation kupferhaltiger Teile vor und nach dem Shredder (siehe Tabelle 24). Zur Berechnung der Kosten berücksichtigte er:

- Direkte Kosten: Kosten aus Arbeitszeit bzw. Investitionen
- Indirekte Kosten: Kosten die sich dadurch ergeben, dass die Menge des Shredderschrotts durch die Maßnahme reduziert wird bzw. separierter Schrott als Schrott geringerer Qualität verkauft werden muss
- Erlössteigerung durch höheren Reinheitsgrad des Schrottes (+ 35 FF/t bei Verringerung des Kupfergehaltes um 0,1%) bzw. höheren Fe-Anteil im Schrott (+15 FF/t für eine um 1 % verbesserte Ausbringung).

Tabelle 24_Kostenbetrachtung Demontage und Shredder nach Russo (1998) (Angaben in französischen Franc bezogen auf die Situation in Frankreich)

Process	Time	Direct costs (1)	Indirect costs	Total costs	Enrichment benefit	Synthesis process choice
Scrap sorting before shredding	5 min/t	5 FF/t	3 FF/t (2)	8 FF/t	(Fe): 10 FF/t	No (benefit not significant)
Size scalping	0	1 FF/t	cost of treatment of the refused material which can be reduced with the NF scale	1 FF/t?	to be confirmed	to be confirmed
Simple dismantling (engine removal)	8 min/t	8 FF/t	+36 FF/t (3) engines are made of if cast iron -85 FF/t(4) if Al engines	44 FF/t or -77 FF/t	(Cu) = 0.12% = 50FF/t (Fe):15FF/t	yes: global benefit of 21 FF/t or 142 FF/t
Intermediate dismantling	2.5 h/car = 4 h/t	240 FF/t	sale of Cu: -67 FF/t(5) scrap	173 FF/t	(Cu) 0.06% = 70 FF/t	no: (global cost: 103 FF/t)
Exhausting dismantling	4 h/car = 6.5 h/t	390 V	sale of second life pieces and material	depends on second life pieces and material sale	(Cu) 0.02% = 85 FF/t (Fe): 45 FF/t	to be confirmed
adding extra sorting operators (e.g. 2 more)	4min/t	4 FF/t	0	4 FF/t	(Cu) = 0.11% = 50 FF/t (Fe):24 FF/t	yes (global benefit 70 FF/t)

(1)The calculation is based on a shredded scrap production of 60 000 t/year and an operator cost of 120.000 FF/year

(2)Cost of the stock: 600 FF/t of scrap x 0.5 % per month

(3)The calculation is based on a cast iron engines price of 600 FF/t and the shredded scrap price of 730 FF/t. In our case, the engine weight was 172.5 kg and the shredded scrap produced with the rest of the car: 432.5 kg

(4)The calculation is based on an aluminium engines price of 1700 FF/t and a shredded scrap price of 730 FF/t. The engine weight is supposed to .be 100 kg and the shredded scrap produced with the rest of the car was 432.5 kg

(5)The calculation is based on a copper content in a normal car of 1 %, a shredding yield of 75 % and a price of the copper pieces removed of 5000 FF/t

Deutlich wird unter anderem, dass zusätzliche Maßnahmen zur Entfrachtung des Schrottes von Kupfer auch ökonomisch sinnvoll wären, wenn der geringere Kupfergehalt sich im Schrotterlös niederschlagen würde. Russo schränkt die Umsetzbarkeit der gefundenen

Ergebnisse jedoch ein, indem er darauf hinweist, dass derzeit die intensive Demontage von Kupfer aus Altfahrzeugen ausschließlich über das Argument "Schrottqualität" nicht realisierbar sei, sondern hierzu vielmehr eine Förderung durch "ecological taxes" oder verbesserte Erlöse für ausgebaute Ersatzteile nötig seien (Russo 1998 S. 350).

8.5.4 Schrotthandel

Der Schrotthandel stellt in der Regel die Verbindung zwischen Schrottanbietern und -abnehmern her. Der weltweit orientierte Handel nimmt auch eine wichtige Rolle bei der Verknüpfung von regionalem Angebot und regionaler Nachfrage ein.

Vor einigen Jahren wurde erstmals ein Erwartungswert für Kupfer in die europäische Schrottsortenliste aufgenommen. Diese Liste stellt eine wichtige Grundlage für die Vereinheitlichung bzw. Normierung von Störstoffgehalten in den Schrotten zwischen den Beteiligten dar. An diese Liste werden auch Erwartungen hinsichtlich der Senkung des Kupfer-Neueintrags in den Stahlkreislauf geknüpft (siehe auch Abbildung 28). Die Spannweite der auftretenden Kupfergehalte wird jedoch ohne weitere Einflussnahme weiterhin relativ groß sein.

Oftmals werden von den Stahlwerken als Abnehmer weitergehende, detailliertere bzw. den eigenen Bedürfnissen angepasste Anforderungen gestellt. Die Untersuchung von Birat (1998) zeigte, dass die Wirkung solcher direkten Aushandlungen zwischen Lieferanten und Abnehmern eher zu einer genauen Einhaltung der Zielwerte für Kupfer führen, als allgemein gesetzte Rahmenbedingungen, wie sie die Schrottsortenliste darstellt (siehe Abbildung 42).

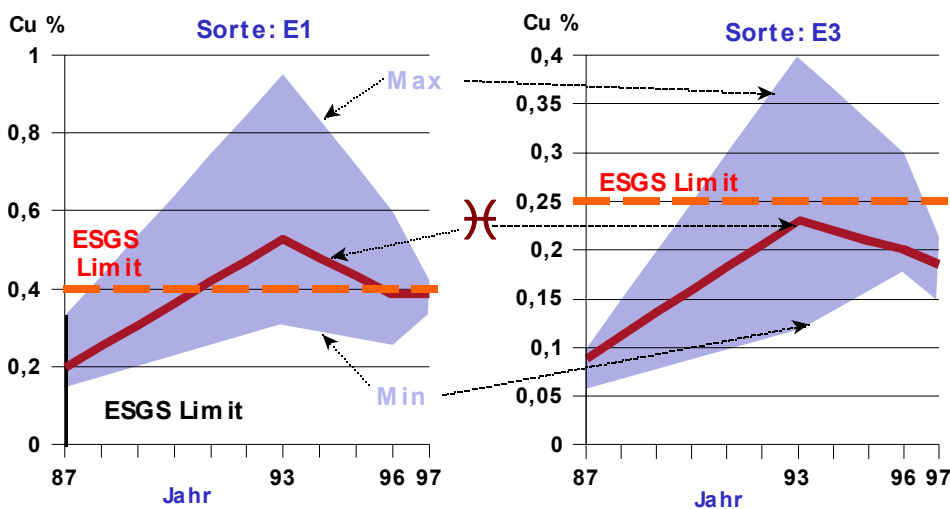


Abbildung 42_ Entwicklung der Kupfergehalte in zwei Schrottsorten [Birat 1998]

Durch derartige Einwirkungen auf der Ebene des Schrotthandels ist die Gesamtwirkung hinsichtlich einer tatsächlichen Entfrachtung der Stoffströme jedoch eher gering. Vielmehr sichert der Schrotthandel aufgrund seiner weltweiten Handelsströme die Verwertbarkeit des Schrottes unabhängig von den jeweiligen regionalen Anforderungen an Kupfergehalte. Auf diese Weise wird jedoch auch der Zeitpunkt, an dem der Kupferspiegel im Stahlkreislauf zu direktem und aktuellem Handlungsdruck führt, hinausgezögert.

8.6 Akteursübergreifende Kommunikation

8.6.1 Regionale Situation

Im norddeutschen Raum sind derzeit ca. 6,5 Mio. PKW zugelassen. Jährlich werden ca. 0,5 Mio. endgültig stillgelegt (siehe Tabelle 25). Die Anzahl der tatsächlich in die Entsorgung gelangenden Altfahrzeuge kann grob mit 10% bis 30% abgeschätzt werden [Sander, 1999, Sander 2001].

Tabelle 25_PKW (M1) -Bestand und endgültige Stilllegungen in Norddeutschland (Stand 1998, Quelle: Kraftfahrtbundesamt)

	Bestand PKW	Endgültige Stilllegungen
Schleswig-Holstein	1.443.006	108.860
Niedersachsen	4.167.188	311.639
Bremen	294.002	25.964
Hamburg	708.618	58.132
Summe	6.612.814	504.595

Mit der Firma Volkswagen AG hat der größte Automobilproduzent Deutschlands seinen zentralen Sitz in Norddeutschland. Die Bedeutung des Segments Klein- und Mittelklassefahrzeuge führt dazu, dass im Vergleich zu Marken, die überwiegend das Oberklasse-Segment bedienen, ein hoher Anteil von Fahrzeugen tatsächlich in der BRD als Altfahrzeuge in die Entsorgung gelangen. Dies wurde auch noch einmal im Rahmen der Diskussion um notwendige Rücklagen im Rahmen der Umsetzung der Altfahrzeug-Richtlinie deutlich.

Die Zahl der im Rahmen der Altauto-Verordnung zertifizierten Demontagebetriebe in Norddeutschland liegt bei ca. 170 (vgl. Tabelle 26). Es handelt sich dabei überwiegend um kleinere Betriebe mit einem Fahrzeug-Durchsatz von unter 1.000 pro Jahr. Mit der Umsetzung des im Juni 2002 verabschiedeten Altfahrzeug-Gesetzes wird sich die Anzahl wahrscheinlich deutlich verringern, weil viele kleinere Unternehmen den ökologischen und ökonomischen Anforderungen nicht gerecht werden können.

Tabelle 26_ Demontagebetriebe und Shredder in Norddeutschland (Stand: 20.6.02)

	Demontagebetriebe Anzahl	Shredder	
		Anzahl	Art
Schleswig- Holstein	41	2	Shredder / 950 Kw Antriebsleistung Mühle / 129 Kw Antriebsleistung Zerdirator / 490 Kw Antriebsleistung
Hamburg	24	1	Shredder / 1470 Kw Antriebsleistung
Niedersachsen	100	3	Mühle / 500 Kw Antriebsleistung Zerdirator / 499 Kw Antriebsleistung Shredder / 920 Kw Antriebsleistung
Bremen	7	2	Shredder / 750 Kw Antriebsleistung Shredder / 498 Kw Antriebsleistung
Summe	172	8	

Derzeit sind 8 Shredderbetriebe im Norddeutschen Raum tätig. Sie verarbeiten neben Restkarossen durchgehend auch alle anderen Shredder-relevanten Schrottsorten. Spezifische Angaben zu dem jeweiligen Inputmix liegen zwar nicht vor. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der Anteil von Restkarossen in der BRD in den vergangenen Jahren bei 1/4 bis 1/3 lag.

Vier Stahlwerke werden in Norddeutschland betrieben (siehe Tabelle 27).

Tabelle 27_ Stahlwerke in Norddeutschland

Salzgitter AG	integriertes Stahlwerk, Elektrostahlwerk, Roheisenerzeugung 3,5 Mio t, Rohstahlerzeugung 4,7 Mio t, Walzstahlversand 4 Mio t
Stahlwerke Bremen GmbH	integriertes Stahlwerk, Rohstahl 2,8 Mio t, Walzstahlerzeugnisse 3 Mio t
ISPA Hamburger Stahlwerke GmbH	Elektrostahlwerk, Direktreduktionsanlage, Eisenschwamm 0,4 Mio t, Halbzeug 1 Mio t, Walzwerksfertigerzeugnisse 0,85 Mio t.
Georgsmarienhütte GmbH	Elektrostahlwerk, Rohstahl 0,6 Mio t, Walzstahlerzeugnisse 0,5 Mio t

8.6.2 Akteursübergreifende Kommunikation

Die akteursübergreifende Kommunikation nimmt im Zusammenhang mit der Reduzierung des Kupferneueintrags in den Stahlkreislauf eine bedeutende Rolle ein. Einerseits liegt die Optimierungsnotwendigkeit auf der Hand („Um einen zukünftigen Anstieg des Kupferspiegels im Stahlkreislauf über das „tragbare“ Maß hinaus zu verhindern, muss jetzt gehandelt werden“). Andererseits existieren jedoch derzeit weder ein akuter Druck noch ökonomische Signale innerhalb des üblichen Planungszeitraums der Akteure in den relevanten Segmenten

(Hersteller, Entsorgungskette). Die Problematik ist bisher auch noch nicht Gegenstand von verbindlichen Setzungen bzw. Anforderungen, die über das direkte Verhältnis individueller Akteure hinaus gehen.

Das in diesem Teilprojekt relevante Akteursnetz ist im Hinblick auf mögliche Impulssetzungen aufgrund seiner vielfältigen Ebenen und Verknüpfungen äußerst heterogen und komplex. Derzeit können einzelne Akteur – ja nicht einmal einzelne Akteurebene - tatsächlich einen Wettbewerbsvorteil durch verändertes Agieren erreichen. Auch der in anderen Zusammenhängen oftmals wichtige Vorteil von Pionieren (first mover advantage) wirkt hier nicht als Anreiz, da viele Maßnahmen, die den Kupfergehalt nach Anfallen des Schrottes senken können (siehe oben) kurzfristig und ohne hohen Investitionsaufwand realisierbar wären und somit ein „Nachziehen“ bei veränderter Marktsituation sehr schnell möglich wäre (Demontage, veränderte Separation vor, in und hinter dem Shredder).

Darüber hinaus handelt es sich bei den Verbindungen zwischen den Akteuren oftmals nicht um eine 1:1 -, sondern um 1:n bzw. n:1 - Verbindungen. So agiert zwischen den Shreddern und den Stahlwerken in großem Umfang der Schrotthandel, der eine Verteilerfunktion bzw. die maßgeschneiderte „Konfektionierung“ aus angebotenen und nachgefragten Qualitäten übernimmt. Ein zweites Beispiel ist die Nutzungsphase, die quasi als Puffer zwischen Hersteller und erster Stufe der Entsorgungskette wirkt. Hinzu kommt, dass Signale entlang der Akteurskette über einen relativ langen Weg vom Sekundärstahlwerk (dem „Betroffenen“) zum Automobilhersteller (dem „Problemsteller“) wirken müssten. Dabei würden sie mit jeder durchwanderten Stufe abgeschwächt, so dass sie beim Produkthersteller keine ausreichende Wirkung mehr entfalten können.

8.6.3 Kommunikationsinstrumente

Innerhalb des Teilprojektes standen vor allem drei kommunikationsorientierte Instrumente im Mittelpunkt: Ein verändertes Leitbild, ein Modell des Stahlkreislaufs in Deutschland und darauf aufbauende Simulationen.

8.6.3.1 Verändertes Leitbild

Vor dem Hintergrund der Zielperspektiven für eine nachhaltige Metallwirtschaft (siehe Kapitel 3.4) wurde ein Leitbild für das anzustrebende Verhältnis „Primär-“¹⁷⁷ zu „Sekundär“-Stahl sowie den Gesamtdurchsatz von Stahl entwickelt:

- Der Anteil von „Primär“-Stahl an der Gesamtproduktion verringert sich auf 30 %. Diese Größenordnung wurde aus den Verlusten während der Nutzungsphase (z.B. durch Korrosion) und unvollständiger Rückführung von Stahlprodukten in den Kreislauf abgeleitet.
- Die Gesamtmenge produzierten Stahls verringert sich um den Faktor 4. Die Produktionsmenge teilt sich in 30 % „Primär-“ und 70 % Sekundärstahl auf.

Darüber hinaus wurde der Fokus von den Quantitäten auf die Qualitäten der Stoffströme gerichtet. Das entwickelte Leitbild führte zu einer deutlichen Problemverschärfung mit Blick auf die Störstoffgehalte, da damit die zukünftigen Möglichkeiten zu deren Verdünnung deutlich reduziert wurden.

8.6.3.2 Stahlmodell

Zur Illustration dieser Problematik wurde ein vereinfachtes Modell der Stahl-Stoffströme entwickelt, das auf die Kupferproblematik fokussiert. Aus verschiedenen Quellen wurden dabei die auf die Produktlebenszyklen bezogenen Stahl-Stoffströme in Deutschland

¹⁷⁷ Primärstahl wird hier als Stahl verstanden, der überwiegend aus primären Rohstoffen (Eisenerz) gewonnen wird. Dabei ist natürlich zu berücksichtigen, dass auch „Primär“-Stahl, wie er derzeit produziert wird, Schrotitanteile enthält (z.B. Kühlschrott). „Sekundär“-Stahl wird in diesem Verständnis ausschließlich oder zu weit überwiegenden Teilen aus Schrott produziert.

zusammengetragen und mit Hilfe des Programms „Umberto“ in einem Sankey-Diagramm dargestellt (vgl. Abbildung 43). Das so entstandene Modell der Stahlstoffströme in Deutschland wurde genutzt, um die Zusammenhänge zu verdeutlichen und um Datenlücken aufzuspüren.

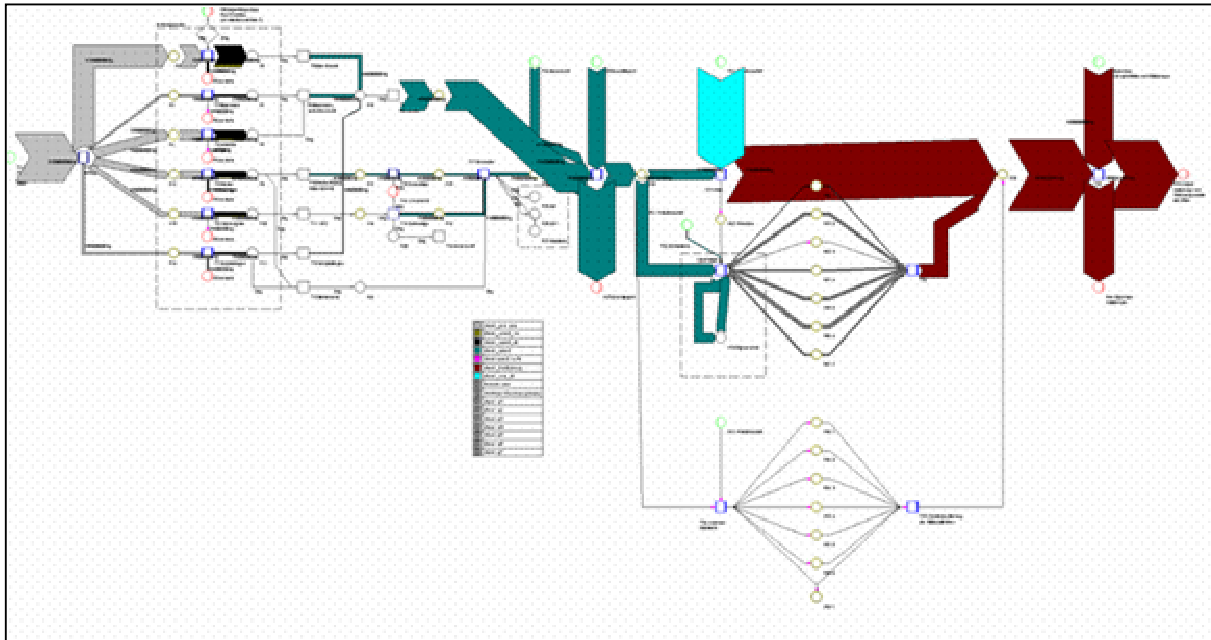


Abbildung 43_ Stahlmodell

Von links nach rechts ist in der Abbildung folgendes dargestellt: Der gesamte in Deutschland verwendete Stahl (steel_pre use) wird in verschiedene Nutzungskategorien aufgeteilt (Bau, Maschinen, Industrieanlagen, weiße bzw. braune Haushaltsware, Fahrzeugbau, Verpackungen). Abzüglich der jeweils entstehenden Verluste, fließt der Stahl (steel_used) in die verschiedenen Recyclingpfade (Schneiden, Schredder, Demontage). Hinzu kommen Neuschrotte und Schrottimporte, der Schrottexport fließt ab. Der Stoffstrom wird anschließend auf die Stahlwerkstypen Hüttenwerk und E-Stahlwerk aufgeteilt, mit Primärmaterial versetzt und zu Halbzeugen verarbeitet. Bei dem E-Stahlwerk haben wir zusätzlich die verschiedenen Qualitätssorten (1 bis 7) dargestellt. Nach den Halbzeug-Importen und -Exporten fließt das Material wieder als gesamter verwendeter Stahl in die Nutzungsphase. In der Nutzungsphase haben wir zusätzlich die Anreicherung mit elementarem Kupfer dargestellt.

Im Modell wurden einige Stoffstrommengen direkt in die Verbindungen (Pfeile bzw. Kanten) zwischen den Prozessen (Rechtecke bzw. Transitionen) eingetragen (siehe Abbildung 43). Für die meisten Prozesse konnten wir die Mengenverhältnisse der zu- und abfließenden Stoffmengen programmieren. Zu erkennen sind diese Transitionen an der dickeren Umrandung. Bei Transitionen mit einem dünnen Rand lagen uns keine Informationen vor.

Es wurde die Möglichkeit angelegt, einzelne Stahlwerke mit ihren spezifischen Situationen (Inputmix, Produkte) aufzunehmen, wie z.B. die ISPAT Hamburger Stahlwerke GmbH oder die Georgsmarienhütte GmbH. Über die grafische Darstellung kann die Stellung des einzelnen Stahlwerks im gesamten Stoffstromgeschehen gut veranschaulicht werden.

8.6.3.3 Simulation

Ziel der Simulation war es, über ein relativ einfach zu handhabendes Tool die potentielle Entwicklung des Kupferspiegels im Stahlkreislauf in der BRD darzustellen und durch Veränderung einzelner Parameter veränderte Entwicklungen aufzunehmen. Dabei wurde auf

die Modellierung mit einem speziellen Simulationstool verzichtet, da die notwendigen mathematischen Zusammenhänge auch mit einer Tabellenkalkulation darzustellen waren. Durch die Verwendung einer bekannten Standardsoftware konnten inhaltliche Experten und Modellierer in einem partizipativen zyklischen Verfahren das Modell gemeinsam entwickeln und testen.

Für die Modellierung wurde folgende Struktur gewählt:

Die Nutzungsphase des Stahls wurde in zwei Produktkategorien aufgeteilt. Die eine Kategorie beinhaltet Produkte, die eine Lebensdauer von ca. 10 Jahren haben und mit größeren Kupfermengen versetzt sind (z.B. PKWs mit Kabelbäumen und elektrischen Stellmotoren, weiße und braune Ware). Die andere Kategorie beinhaltet Produkte, die eine Lebensdauer von ca. 80 Jahren haben, nur mit wenig elementarem Kupfer versetzt sind (z.B. Stahlträger von Gebäuden), jedoch einen höheren Gehalt an im Stahl "gelöstem" Kupfer enthalten. Diese Kategorisierung erlaubte eine grobe Einteilung der Stahlqualitäten und Bestandsmengen. In den Nutzungsphasen selber wurde die Lebensdauer der Produkte nicht besonders berücksichtigt. Die Nutzungsphase wurde als „See“ modelliert, in den Kupfer und Stahl hineinströmen, vollständig vermischt werden und dann mit der sich ergebenden Kupferkonzentration (Verhältnis von Stahl und Kupfer) in den Recyclingpfad hinausströmen. Für die Kategorie „80 Jahre Produkte“ besteht der Recyclingpfad nur aus einer Zerkleinerung (Schere). Das Material wird dann in dem Elektroofen-Stahlwerk zu Neustahl verarbeitet. Der Recyclingpfad der Kategorie „10 Jahre Produkte“ besteht aus einem Demontageschritt mit Kupferausschleusung und einer Aufteilung des Materialstroms in den Elektroofen und Konverter.

Das Modell besteht also aus zwei Kreisläufen:

- Dem inneren Kreislauf, der die Stoffflüsse von lang in der Nutzungsphase verbleibenden Stahl beschreibt (ca. 80 Jahre). Dieser Stahl hat einen relativ hohen Gehalt „gelöstem“ Kupfers, jedoch nur geringe Anteile anhaftenden Kupfers.
- Dem äußeren Kreislauf, der die Stoffflüsse von relativ kurz (ca. 10 Jahre) in der Nutzungsphase verbleibenden Produkten beschreibt, die relativ geringe Anteile „gelöstem“ Kupfers enthalten, jedoch höhere Anteile anhaftenden Kupfers.

Das Modell rechnet in Jahresschritten und es können folgende Parameter eingestellt werden:

Tabelle 28_ Parameter und Werte des Stahlmodells

Wertbeschreibung	Wert
Roheisenerzeugung	30000000
Kupfergehalt vom Roheisen	0,01%
Roheisen Steigerungsrate pro Jahr	0,00%
Kupfer-Input in Produktion	400000
Kupfermenge Steigerungsrate pro Jahr	0,50%
Anteil der Kupfermenge in 10a-Produkten	90%
Bestand (gesamt)	600000000
Anteil von 10 Jahres-Produkten am Bestand	25%
Kupfergehalt Bestand in 10 Jahres-Produkten	2%
Bestand-10a-Fe-Startwert	147000000
Bestand-10a-Cu-Startwert	3000000
Kupfergehalt Bestand in 80 Jahres-Produkten	0,20%
Bestand-80a-Fe-Startwert	449100000
Bestand-80a-Cu-Startwert	900000
Schrottmenge (gesamt)	13000000
Schrott ohne Cu-Separation (Anteil)	75%
Schrottmenge Steigerung	0,00%
Schrott ohne Cu-Separation - Startwert	9750000
Schrott mit Cu-Separation-Startwert	3250000
Restkupfer nach Kupferseparation	5,00%
Schrott nach Cu-Separation zum Konverter (Anteil)	75%
Kupferanteil "Schrott nach Cu-Separation-zu-Konverter"	0,100%

Für die Szenarienberechnung wurden diese Parameter variiert. Szenarien dienen dazu, mögliche Zukunftsentwürfe von Modellen darzustellen, indem verschiedene Modellparameter geändert werden. Szenarien sind keine Vorhersagen der Zukunft, sondern eine Aussage darüber, wie die Situation in der Zukunft sein könnte. Im Folgenden werden drei Szenarien vorgestellt:

Das „Ist-Szenario als Trendfortschreibung“ mit den wahrscheinlichsten Annahmen.

Das „30/70 Szenario“: Ausgehend vom Ist-Szenario wird angenommen, dass bis zum Jahr 2050 die Primärstahlmenge auf 30 % (9 Mill. t) der gesamten produzierten Stahlmenge sinkt und die Sekundärstahlmenge auf 70 % (34 Mill. t) linear erhöht wird. Die Gesamtmenge des produzierten Stahls bleibt dabei gleich.

Das „Faktor 4; 30/70 Szenario“: Basierend auf dem 30/70 Szenario wird zusätzlich die Gesamtmenge des produzierten Stahls um den Faktor 4 verringert (von 30 Mill. t auf 10,5 Mill. t). Der Rest teilt sich auf in 30 % Primär- (3,2 Mio. t) und 70 % Sekundärmaterial (7,3 Mio. t).

In Abbildung 44 sind die Ergebnisse des Szenarios „Faktor 4; 30/70“ dargestellt.

Szenario 4: Faktor 4; 30/70

Die Gesamtmenge wird um Faktor 4 verringert (10,5 Mill. t). Der Rest teilt sich auf in 30 % Primär- (3,2 Mill t) und 70 % Sekundärmaterial (7,3 Mill t)

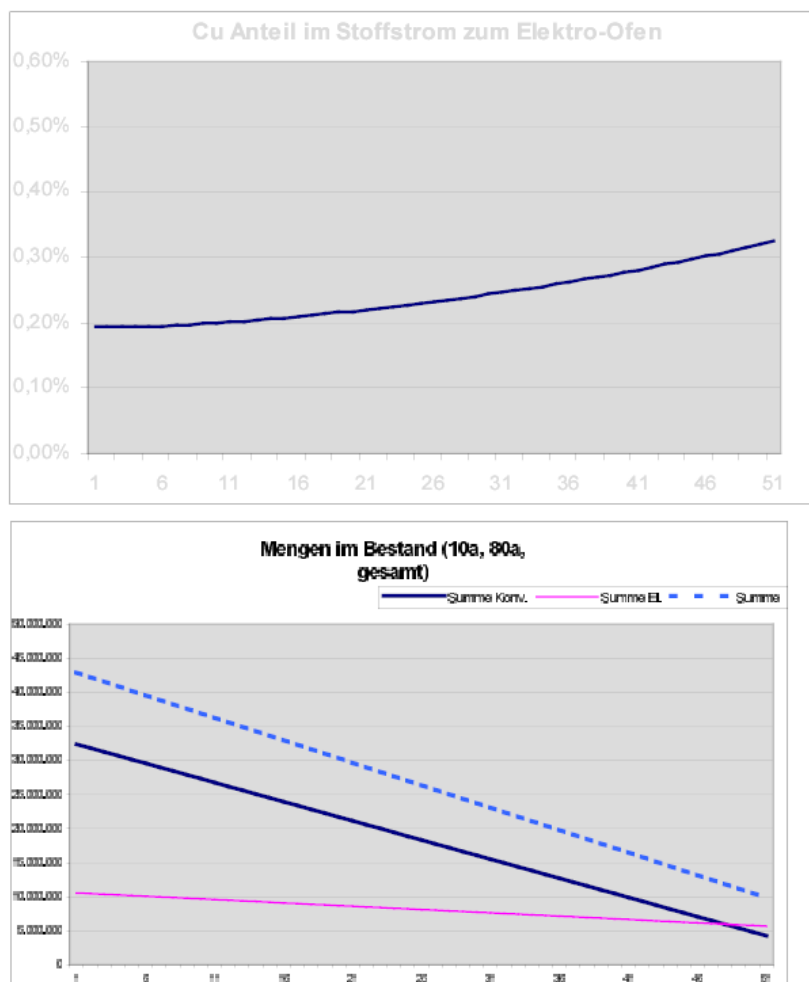


Abbildung 44_Ergebnisse des Szenarios „Faktor 4; 30/70“

8.7 Akteursworkshop

Im Rahmen des Projektes wurde am 12. Juni 2001 ein Workshop zum Thema „Die Zukunft des Stahlkreislauf - Kupfer als Störelement“ veranstaltet. Der Teilnehmerkreis war dabei so ausgewählt, dass Vertreter aller wesentlichen Akteursgruppen unter möglichst weitgehender Berücksichtigung unseres regionalen Ansatzes an der Diskussion teilnahmen (vgl. Tabelle 29). Ziel der Diskussion war es, herauszuarbeiten, bei welcher Akteursebene welcher Problemdruck vorliegt, welche Veränderungen unter welchen Bedingungen realisierbar wären und welches die wesentlichen Hemmnisse sind gegenüber einer Implementierung des Anliegens "Verringerung des Kupferspiegels im Stahlkreislauf" im gesamten Akteursnetz.

Die Diskussion zeigte, dass die grundsätzliche Problemsicht geteilt wird und lediglich

hinsichtlich der Lösungsansätze und Zeithorizonte unterschiedliche Vorstellungen vorhanden sind. Es wurde ebenfalls bestätigt, dass jeder einzelne Akteursbereich über gewisse Handlungsmöglichkeiten verfügt. Der optimale Ansatzpunkt für die Zielerreichung wurde allerdings von den jeweiligen Akteurebenen zum einen jeweils unterschiedlich verortet: Automobilhersteller verweisen z.B. auf das Potential der Shredder zur Kupferseparation. Oder es wurden zum anderen Anforderungen an die jeweils vor- oder nachlaufende Station in der Akteurskette gestellt (z.B. Entnahme des Kupfers beim Demontagebetrieb, wenn von Seiten der Shredder eine veränderte Preisgestaltung hinsichtlich des entfrachteten Schrottes realisiert würde). Die Diskussionen während des Workshops (aber auch während der gesamten Projektlaufzeit) zeigten, dass in den vorhandenen Strukturen noch kein selbst steuerndes System auf der Basis der derzeit wirkenden Mechanismen und Impulse realisiert werden kann, mit dem eine grundsätzliche Lösung erreicht werden könnte (1:1-Verhältnis von System veränderndem Impuls und gewünschter Lösung). Deutlich wurde jedoch auch das nicht zu unterschätzende Wirkungspotential einer Wertschöpfungsketten übergreifenden Kommunikation mit Blick auf diese Problemstellung. Trotz fehlender direkt und kurzfristig wirkender Signale haben inzwischen viele Automobilhersteller sowie die Verbände der Shredderbetreiber die Problematik im Rahmen teilweise auch öffentlich zugänglicher Untersuchungen behandelt (z.B. über Demontageuntersuchungen, Nennung eines Cu-Wertes im European Scrap Specification System ESSS).

8.8 Schlussfolgerungen

Um den kommunikationsorientierten Ansatz auch im realen Rahmen über die gesamte Akteurskette wirken zu lassen, erscheint es notwendig, das Anliegen akteursübergreifend zu institutionalisieren. Regulative bzw. instrumentelle Steuerungsmaßnahmen (Normen, Standards, rechtliche Regelungen) können hier sicherlich stützend wirken (z.B. der oben beschriebene Ansatz der Europäischen Schrottsortenliste).

Als Beispiel für einen Impuls zur Neustrukturierung der Akteurskette kann das zum 1.7.2002 in Kraft getretene deutsche Altfahrzeuggesetz gesehen werden, das auf der EU-Altfahrzeug-Richtlinie 53/2000/EC basiert. Die darin festgeschriebene Pflicht der Hersteller, die Kosten der Entsorgung zu tragen, kann einen bedeutenden Impuls zur Neustrukturierung der Entsorgungskette erzeugen. Der Demontagebetrieb erhält in dem neu zu etablierenden System den notwendigen Entsorgungsbetrag vom Hersteller, der wiederum motiviert wird, auf die Kostensituation bei der Entsorgung und beim Demontagebetrieb durch konstruktive Verbesserungen bei den Produkten Einfluss zu nehmen. Aufgrund der Struktur der Kostenübernahme nimmt hier der Hersteller die Rolle desjenigen ein, der ein bestimmtes Anliegen (Erfüllung der Anforderungen des Gesetzes bei möglichst geringen Kosten) in der Gesamtkette implementiert. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der hier entstehende „Systemführer“ eigene wirtschaftliche Interessen hat, die nicht deckungsgleich sind mit denen der Akteure in der Entsorgungskette. Die asymmetrischen Machtverhältnisse, die durch die jeweiligen finanziellen Hintergründe sowie Größe und Anzahl der Betriebe bestimmt werden (siehe oben Kapitel 8.6 Akteursübergreifende Kommunikation), beinhalten das Risiko des Verlustes der Unabhängigkeit der meist mittelständischen Demontage- bzw. Shredderbetriebe.

Die steuernde Einflussnahme auf die gesamte Kette wird z.B. im Rahmen der Entwicklung des VW-Sicon Verfahrens deutlich. Um die Umsetzung der Produzentenverantwortung nach Altautorichtlinie möglichst kostengünstig zu erreichen, entwickeln Automobilhersteller ein Verfahren zur Entsorgung der Shredderleichtfraktion. Die Verwertungswege stellen dabei bestimmte Anforderungen an das Material (z.B. Störstoffgehalte der Teilfraktion, die als Reduktionsmittel im Hochofen eingesetzt werden soll). Um diese zu erfüllen, organisieren die Hersteller Aktivitäten der Demontagebetriebe (z.B. Pflicht zur Demontage des Antriebsstranges), der Shredder (z.B. Positiv- und Negativliste für den Shredderinput) und der Stahlwerke (Anpassung der Hochöfen an die Verwendung des aufbereiteten Kunststoffgranulats). Ebenfalls überprüft wird die Konstruktion der Autos selbst.

Die Implementierung des Anliegens "Senkung des Kupferspiegels im Stahlkreislauf" dürfte dann die höchste Akzeptanz erreichen, wenn die „Führung des Systems“ in Eigenregie durch die Akteursgruppe erfolgt, am besten unterstützt durch einen möglichst neutralen "Intermediär". Dieser Intermediär könnte z.B. eine akteursübergreifenden Arbeitsgruppe organisieren und moderieren.

Der weltweite Handel mit Schrotten und das weltweite Akteursnetz setzen dem regionalen Ansatz zur Problemlösung Grenzen. Die Erfahrungen nicht zuletzt aus dem durchgeführten Workshop zeigen jedoch, dass es sehr wohl möglich ist, den Keim für eine Entwicklung im größeren Raum auf regionaler Ebene zu setzen.

Tabelle 29_ Teilnehmer am Workshop "Die Zukunft des Stahlkreislaufs - Kupfer als Störelement", 12. Juni 2001

BMW AG	Reinhard Hoock
DEUMU – Dt. Erz- u. Metall-Union GmbH	Jürgen Mertner
Fachhochschule Hamburg	Prof. Dr. Arnim von Gleich
FH Braunschweig/Wolfenbüttel	Prof. Dr. Joachim Schmidt
Forschungszentrum Jülich GmbH	Dr. Wilhelm Kuckshinrichs
Georgsmarienhütte GmbH	Frank Treppschuh
ISPAT Hamburger Stahlwerke GmbH	Dr. Uwe Braun, Sven Schnabel, Dr. Michael Thiele
Koordinationsbüro Nachhaltige Metallwirtschaft	Silke Kracht
Ökopol GmbH	Knut Sander, Dirk Jepsen
Retek GmbH	Martin Knode
RRO GmbH	Claudia Mainz
SUmBi – Ing.Büro f. Sozial- u. Umweltbilanzen	Martin Brahmer-Lohss, Manuel Gottschick
Technische Universität Bergakademie Freiberg	Dr. Ing. Luben Savov
Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh)	Rudolf Ewers
Wirtschaftsvereinigung Metalle	Dr. Rudolf Wilden

9 Verwertungsmöglichkeit von Strahlmittelabfällen als Rohstoff für Sinterstähle

Stoffe, die ihren Nutzungszweck erfüllt haben und nicht mehr gebraucht werden, sollten möglichst hochwertig verwertet werden. Mit dieser Zielperspektive wurden das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz konzipiert und Strategien zur Kreislaufwirtschaft entworfen. Recycling ist eine zentrale Strategie mit Blick auf den Ressourcenschutz. Durch Recycling können zudem Abfallmengen verringert und zusätzliche Emissionen bei der möglicherweise aufwändigeren Herstellung von Neuware vermieden werden. Letztendlich muss aber im Einzelfall geprüft werden, ob Recycling tatsächlich die nachhaltigste Strategie ist, denn auch beim Recyceln werden Energien und Ressourcen verbraucht und insbesondere Emissionen freigesetzt, die durchaus hohe toxische Relevanz haben können.

In diesem Teilprojekt sind wir jedoch noch einen Schritt weitergegangen. Wir haben nicht nur versucht, ein möglichst hochwertiges Material-Recycling zu erreichen und dabei auch ‚lange Transportwege‘ zu vermeiden. Wir wollten vielmehr - ganz im Sinne des Modells einer ‚industriellen Symbiose‘ - zwei Unternehmen so miteinander zu verknüpfen, dass der Abfall des einen Unternehmens in der Region als Rohstoff eines anderen Unternehmens genutzt werden kann. Mit derartigen Verknüpfungen kann in den meisten Fällen zumindest ein kaskadenförmiges down-cycling realisiert. Wir wollten aber noch einen Schritt weiter gehen, indem nicht nur das Material des Strahlmittels, also der Stahl, genutzt wird, sondern auch dessen spezielle Struktur, eben die Pulverform, in der diese Strahlmittelabfälle vorliegen. Die Pulverform verleiht den Strahlmittelabfällen einerseits besonders gefährliche Eigenschaften (Staubförmigkeit, ggf. Entzündlichkeit, kleinere Partikel sind lungengängig), andererseits sind pulverförmige Metalle auch genau in dieser Form eine normalerweise erst aufwändig herzustellen Voraussetzung für pulvermetallurgische Verfahren.

9.1 Ausgangslage

Zum Reinigen und zur Vorbehandlung für Beschichtungszwecke von Stahloberflächen werden die dafür vorgesehenen Stahlträger und -bleche durch einen Strahlprozess gereinigt. Bei diesem Strahlprozess wird Stahlpulver mit hohem Druck auf das zu reinigende Teil geschleudert und auf diese Weise z. B. Zunderschichten entfernt und die Oberfläche mechanisch aufgeraut. Für diesen Prozess werden in der Regel kugelförmige Stahlpulver unterschiedlicher Korngrößen eingesetzt. Die Herstellung derartiger Pulver erfolgt meist durch Wasserverdüsung einer Stahlschmelze. Je nach Anwendungsfall differieren die Korngrößen von 0,2 – 3,15 mm, wobei zum Strahlen von unlegierten Stählen meist Strahlmittel im Korngrößenbereich von 0,8 – 1,2 mm Anwendung finden.

Nach dem Strahlprozess liegt eine Mischung aus Strahlpulver und abrasiv abgearbeiteter Teilchen des Substratmaterials als Abfall vor. Im Rahmen des Projektes sollte untersucht werden, ob der Reststoff als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Sinterstählen Verwendung finden kann. Dieser Gedanke lag insofern nahe, als einige Verfahren zur Herstellung von Metallpulvern auf ähnliche Prinzipien zurückgreifen (mechanischer Aufprall / Formveränderung).

9.1.1 Herstellung von Sinterstählen

Unter „Sinterstählen“ werden in der Metallverarbeitenden Industrie Werkstoffe verstanden, die aus legiertem und unlegiertem Stahl auf pulvermetallurgischem Wege hergestellt sind. Bei der pulvermetallurgischen Fertigung erfolgt eine besonders intensive Ausnutzung der Rohstoffe, und es können komplexe Geometrien mit hoher Genauigkeit in Großserien hergestellt werden. Als „Pulvermetallurgie“ wird nach ISO 3252 dasjenige Teilgebiet der Metallurgie bezeichnet, das sich mit der Herstellung von Metallpulvern oder Gegenständen

aus solchen Pulvern durch Anwendung eines Formgebungs- und Sinterprozesses befasst. Die Herstellung derartiger Werkstoffe besteht aus den Fertigungsstufen:

- Gewinnung der Ausgangsstoffe (Pulverherstellung)
- Verdichtung und Formgebung
- Verfestigung durch Sinterung

Für Bauteile aus Sinterstahl werden – in Abhängigkeit von der späteren Aufgabe - Pulver mit Teilchengrößen zwischen 100 – 800 µm verwendet.

9.1.2 Pulverherstellung

Für die Sinterteilfertigung werden Metallpulver verwendet, die nach der DIN 30900 aus einem Haufwerk von Teilchen kleiner als 1 mm bestehen. Die Pulverherstellung kann aus dem festen oder aus dem flüssigen Zustand erfolgen. Eines der ältesten Verfahren zur Herstellung von Metallpulvern stellt das „Hametag“-Verfahren dar. Hierbei werden Metallspäne, die aus der spanabhebenden Fertigung anfallen, als Ausgangsprodukt eingesetzt. Bedingt durch deren Größe muss in einem zweiten Schritt die Zerkleinerung der Späne in einem Mahlprozess erfolgen. Die hierfür eingesetzten Wirbelschlagmühlen führen auf Grund der erheblichen Lärmbelastung zu großen Umweltproblemen, außerdem ist der Verschleiß am Mahlaggregat erheblich. Aus diesen Gründen wird dieses Verfahren zumindest in den westlichen Ländern nicht mehr eingesetzt. Interessant ist hier allerdings, dass bei diesem Verfahren bereits Abfallstoffe aus der Metallbearbeitung als Rohstoff genutzt werden.

Ein weiteres Verfahren zum mechanischen Zerkleinern von Ausgangsmaterial zur Herstellung von Metallpulvern ist das „Coldstream“-Verfahren. Dabei werden die groben Metallteile mit Druckluft auf eine Metallplatte geschossen und dadurch zertrümmert. Dieses Verfahren, das dem Strahlprozess nicht unähnlich ist, findet heute noch bei der Herstellung von Pulvern für die Herstellung von Hartmetallen Verwendung.

Derzeit spielen die Wasserverdünnungsverfahren bei der Metallpulverherstellung die weitaus größte Rolle. Als Ausgangsprodukt dient in diesem Fall eine Stahlschmelze, die im Elektroofen hergestellt wird. Rohstoff sind häufig Abfälle aus Tiefziehblechen, die auf Grund ihrer chemischen Zusammensetzung einen hohen Reinheitsgrad aufweisen. Die Schmelze wird beim Auslaufen aus einer Düse mit einem Wasserstrahl zu Pulver zerstäubt. Dabei kann die Teilchengröße durch die Wahl des Wasserdruckes eingestellt werden. Dieser Herstellungsschritt ist weitgehend identisch mit der Herstellung von Strahlmitteln für die Oberflächenbehandlung von Stahlblechen. Bei diesem Verfahren fällt wiederum Abfall in Form von Wasser/Metall-Schlamm an, der entsorgt werden muss.

9.1.3 Mengenaufkommen von Strahlmittelabfälle in der BRD

Zur Quantifizierung der in der BRD verfügbaren Strahlmittelabfälle kann überschlagsweise das 1,5-fache der Strahlmittelproduktion zugrunde gelegt werden. Nach Schätzungen werden jährlich 47.000 – 51.000 to produziert¹⁷⁸ und somit fallen folglich ca. 70.000 – 77.000 to Strahlmittelabfälle an. Der Abfall liegt dabei in sehr unterschiedlichen Qualitäten vor. Für eine genauere Feststellung von Mengenangaben für das Ausgangsmaterial zur Herstellung von Sinterstählen wären differenzierte Erhebungen notwendig.

¹⁷⁸Angaben Hersteller, 2001

9.2 Strahlmittelabfälle bei Jungheinrich

9.2.1 Strahlmittel

Die Fa. Jungheinrich setzt für die Oberflächenbehandlung etwa 18 to an Strahlmittel pro Jahr ein. Die verwendeten Strahlmittel bestehen aus bainitischem Stahlguss mit einer Härte von ca. 420 HV 1, die chemische Zusammensetzung geht aus der Tabelle 30 hervor:

Tabelle 30_ Chemische Zusammensetzung des Strahlmittels (%)

C	Si	Mn	Fe	P	S
0,1	0,15	1,2	Rest	0,015	0,015

9.2.2 Gestrahlte Werkstoffe

Bei der Fa. Jungheinrich werden Stahlprofile der Stahlqualität S 235 und S 355 zur Vorbehandlung für das abschließende Lackieren gestrahlt. Die chemische Zusammensetzung nach DIN/EN 10025 derartiger Stahlqualitäten geht aus der Tabelle 31 hervor.

Tabelle 31_ Chemische Zusammensetzung von Baustahl

C	Si	Mn	Fe	P	S
max. 0,2		max. 1,6	Rest	max. 0,045	max. 0,045

Bei dem Strahlen der Stahloberflächen fallen ca. 37 to Abfälle pro Jahr an, die derzeit als Abfall entsorgt werden müssen.

9.2.3 Beschaffenheit der Strahlmittelabfälle

Die Strahlmittelabfälle der Fa. Jungheinrich wurden im Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und geometrischen Beschaffenheit untersucht. Die Abbildung 45 zeigt die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme derartiger Abfälle. Die Teilchengröße der Partikel lag zwischen 0,01 und 1 mm, wobei die geometrische Form in starkem Umfang variierte. Die chemische Zusammensetzung der Abfälle entspricht der Ausgangszusammensetzung der eingesetzten bzw. gestrahlten Werkstoffe. Eine Verunreinigung durch Fremdstoffe konnte nicht festgestellt werden.

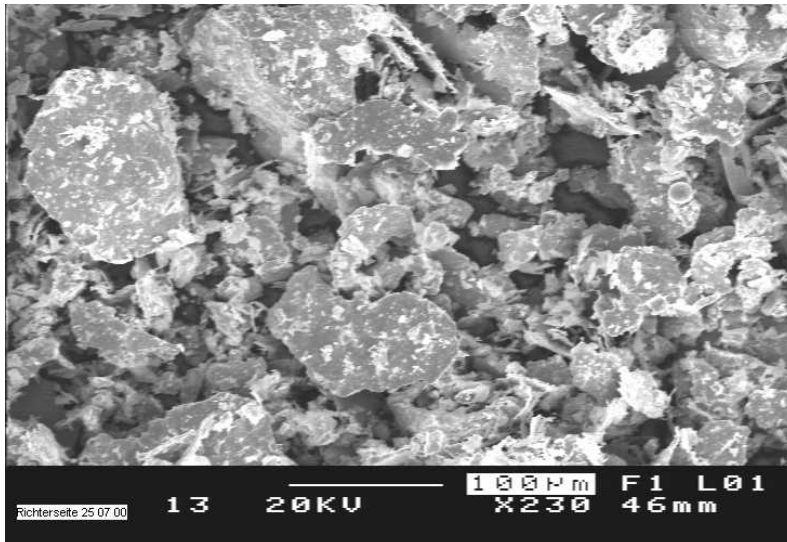


Abbildung 45_Rasterelektronische Aufnahme der Strahlmittelabfälle

9.2.4 Einsatzmöglichkeit als Rohstoff für Sinterstähle

Bei den untersuchten Strahlmittelabfällen handelt es sich um weitgehend sortenreine Abfälle. Sie eignen sich auf Grund ihrer pulverförmigen Beschaffenheit grundsätzlich für eine Sekundärverwendung als Ausgangsstoff für den Einsatz als Metallpulver für die Fertigung von Sinterteilen. Dabei lässt das große und weitgehend undefinierte Teilchenspektrum lediglich die Herstellung von Sinterformteilen mit einer großen Restporosität zu, soweit nicht durch eine Siebanalyse die Teilchengrößenverteilung homogener gestaltet werden soll. Dieser Schritt ist aber auf Grund der geringen Menge wenig wirtschaftlich. Weiterhin können nur Bauteile geringer Festigkeitsanforderungen aus derartigen Pulverqualitäten hergestellt werden. Denkbar sind z.B. Filterwerkstoffe oder auch Trägerwerkstoffe für Reibbeläge. Bei Filterwerkstoffen wird aber meist ebenfalls eine sehr homogene Teilchengröße benötigt, um eine reproduzierbare Filterwirkung sicherstellen zu können.

Bei der Herstellung von Reibbelägen für den Einsatz als Bremsen unterschiedlichster Art werden ebenfalls Sinterwerkstoffe eingesetzt. Hierbei findet eine breite Palette unterschiedlicher Rohstoffe Verwendung, da das Reib- und Bremsverhalten auf den jeweiligen Einsatzfall abgestimmt werden muss. Derartige Bremsbeläge werden von der Firma Honeywell Bremsbeläge GmbH (früher Jurid) in Glinde hergestellt. Bei der derzeitigen Produktion werden ca. 250 t Eisenpulver benötigt. Um die grundsätzliche Eignung der Strahlmittelabfälle als Ausgangsmaterial zu bewerten, wurden Sinterversuche bei der Fa. Honeywell Bremsbeläge GmbH durchgeführt. Hierfür wurden die Strahlmittelabfälle als Beimischung zu dem herkömmlichen Eisenpulver hinzugefügt und die Probekörper entsprechend den internen Sintervorschriften hergestellt. Die Abbildung 46 zeigt derart hergestellte Probekörper und die Abbildung 47 die Mikrostruktur des Sinterbauteiles.

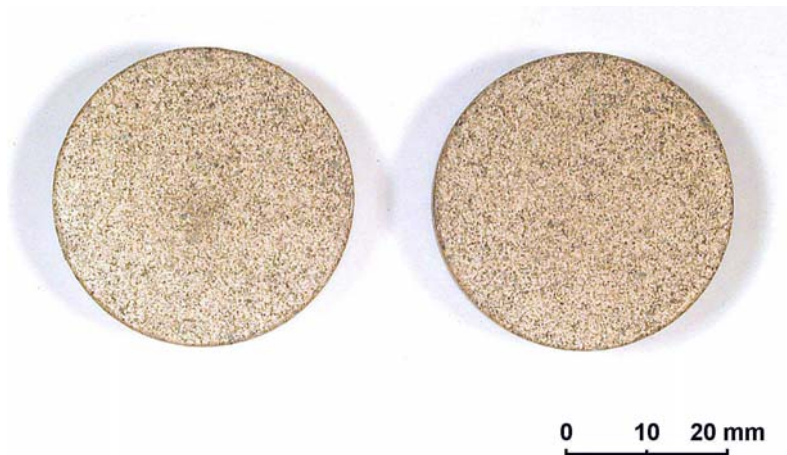


Abbildung 46_ Probekörper für Reibbeläge

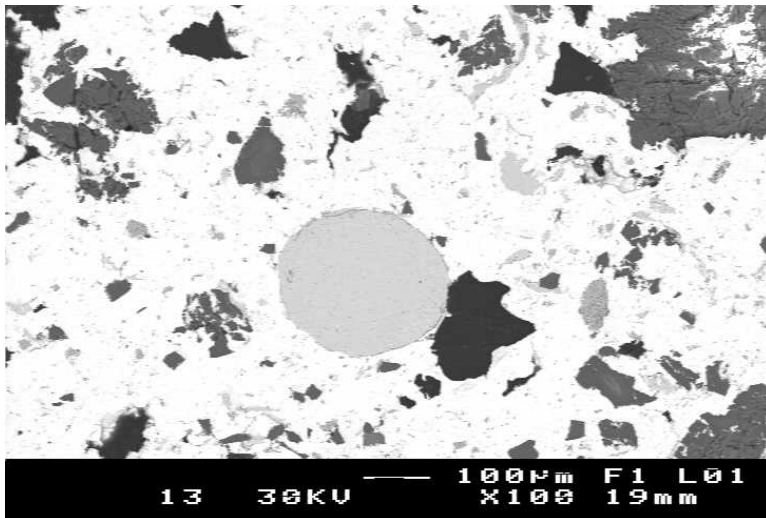


Abbildung 47_ Mikrostruktur der Probekörper

Die Beimischungen zeigten keinerlei negative Auswirkungen auf das Sinterverhalten. Ein Einsatz derartiger Abfälle ist von daher technisch ohne weiteres möglich.

9.2.5 Einschränkungen

Auch, wenn wir die technische Machbarkeit dieser hochwertigen Abfallverwertung aufzeigen konnten, so ist doch der ökonomische Vorteil für den Sinterhersteller zu klein, als dass dieser den organisatorischen Aufwand und das Risiko dieser unerprobten Kooperation eingehen wollte. Das Risiko liegt zum einen in der Abhängigkeit vom Abfallstrom eines anderen Unternehmens, also in der zusicherbaren Liefermengen bzw. der Kontinuität der Lieferung von Stahlmittel. Ein zweites Risiko liegt in den Schwierigkeiten bei der Qualitätssicherung des Strahlmittelabfalls.

Die Qualitätsmanagement-Systeme (QM) nach ISO 9001 ff verlangen von den zertifizierten Betrieben eine formale überprüfbare und beschriebene Vorgehensweise bei Beschaffungsvorgängen. Die Beschaffungsanforderungen müssen im QM-Handbuch festgelegt, überprüft und dokumentiert werden. Weiterhin hat auch ein Lieferant für derartige Betriebe Verfahrensanweisungen zu erstellen, die ihn in die Lage versetzen, die jeweiligen Qualitätsanforderungen sicher zu stellen.

Es liegt auf der Hand, dass diese Kriterien in dem vorliegenden Fall (aber auch generell für eine derartige Verwendung von Abfallstoffen) nicht erfüllt werden können, zumal es sich bei

Bremsbelägen um sicherheitsrelevante Bauteile handelt. Insofern besteht die Notwendigkeit, geeignete Zwischenschritte einzuschalten, die es erlauben, derartige Reststoffe unter Berücksichtigung der Kundenanforderungen (wie Verfügbarkeit und Qualitätssicherungsaspekte) einer Verwendung zuzuführen. Dazu müsste ein Zwischenhändler größere Mengen zusammenführen und eine Qualitätssicherung jeder Charge anbieten. Dies dürfte jedoch bei diesem wenig wertvollen Rohstoff (noch) nicht ökonomisch darstellbar sein. Eine denkbare Alternative bestünde darin, den Beimischungsgrad so gering zu halten, dass Auswirkungen auf die Qualität des Bauteiles weitgehend ausgeschlossen werden können.

Um über diesen Einzelfall hinaus eine Basis zur Beurteilung der Eignung derartiger Abfälle für die Herstellung von pulvermetallurgischen Erzeugnissen zu haben, ist es notwendig, weitere Untersuchungen zum Sinterverhalten der Pulver durchzuführen. Von Seiten der Projektpartner besteht großes Interesse an weiterführenden Untersuchungen, um einen Einsatz abschließend beurteilen zu können.

Folgende Ergebnisse können aber schon jetzt festgehalten werden:

- Hochwertiges Recycling metallischer Strahlmittel ist – wie in diesem Beispiel gezeigt – nicht nur als Recycling des Materials, sondern auch in Form einer Nutzung der pulverförmigen Struktur prinzipiell technisch machbar.
- Die regionale Nähe hat durch Vertrautheit mit den Gegebenheiten und Personen und durch kurze Wege die Gesprächsbereitschaft gefördert und eine Verständigung ermöglicht.
- Hochwertiges Recycling benötigt einen höheren Organisationsaufwand, der effizient gestaltet werden und / oder durch die niedrigeren Rohstoffpreise bzw. andere Vorteile aufgewogen werden muss (mit Titan würde die Situation anders bewertet werden).
- Der Einsatz hochwertigen Recyclingmaterials setzt eine anerkannte Qualitätssicherung voraus, die die gleichen Standards garantiert, welche auch die primäre Rohstoffherstellung erfüllen muss.
- Hochwertiges Recycling benötigt weiterhin eine Liefersicherheit, die die gleichen Standards erfüllt, wie sie auch für die üblichen Rohstofflieferungen gelten.

10 Schleifschlammrecycling

10.1 Ausgangslage

Metallhaltige Schleifschlämme fallen bei der spanenden Bearbeitung von Stählen an. Sie lassen sich sowohl aufgrund ihres üblicherweise hohen Gehaltes an Kühlschmierstoff-Ölen und -Emulsionen (KSS) als auch aufgrund ihrer stofflichen Zusammensetzung und ihrer Kornstruktur nur schwer in den (Sekundär-) Stahlprozess zurückführen:

- Mit Blick auf den Boden- und Gewässerschutz müssen bei Lagerung und Transport von mit KSS-behafteten Schleifschlämmen besondere Vorrichtungen zur Vermeidung von Tropf- und Leckverlusten eingesetzt werden.
- Die Kohlenwasserstoffverbindungen der KSS-Anhaftungen führen in den thermischen Prozessen der Schrottverwertung zu teilweise problematischen Emissionen, insbesondere, wenn sie Halogenanteile enthalten, z.B. aus der KSS-Additivierung, aus Lackresten oder aufgrund sonstiger Verunreinigungen.
- Neben einem Feuchteanteil von 60-80% (KSS-Öl bzw. Öl-Wasseremulsion) weisen Schleifschlämme je nach Schleifprozess auch einen relevanten mineralischen Anteil auf, aus dem Abrieb der Schleifscheiben. Dieser muss beim Wiedereinschmelzen abgeschieden bzw. in die Schlacke überführt werden.
- Auch die Metallanteile im Schleifschlamm sind überwiegend so feinkörnig, dass sie ohne spezielle Vorrichtungen beim Einsatz in Schmelzbäder aufschwimmen und verschlacken.

Aus den angeführten Gründen wurden Schleifschlämme jahrelang nicht verwertet, sondern auf Deponien endgelagert. Sowohl im Zuge neuer schärferer Deponiegrenzwerte, als auch unter dem Aspekt der Privilegierung von Verwertungs- gegenüber Beseitigungsverfahren im neuen Abfallrecht (KrW-/AbfG) wurden in den vergangenen Jahren verschiedenste Verfahrenskombinationen zur stofflichen Verwertung von KSS-behafteten Schleifschlämmen entwickelt.

Diese Verfahren unterscheiden sich sowohl in der Art der Vorbehandlung als auch in der Stelle der Wiedereinschleusung in den Stahlprozess. Einige zumindest in Pilotanlagen realisierte Vorbehandlungsverfahren sind:

- Einfache Entfeuchtung durch Abtropfen auf Rüttelrosten,
- KSS-Entfernungen durch Waschen und anschließende Lösemittelextraktion,
- Abpressen und Kompaktieren in Brikettierpressen,
- Thermische Entölung und Kompaktierung durch spezielle Sinterprozesse.

Typische Wiedereinsatzstellen in den Stahlprozess sind:

- Einblasen in den Hochofen (Rohstahlprozess),
- Einbringen von kompaktierten Schlämmen (Briketts) in das Sekundärstahlbad (Elektrostahlwerk),
- Einsatz in Gießereiöfen,
- Einsatz als Zuschlagstoff im Klinker-Brennprozess der Zementherstellung.

Unter dem Blickwinkel von ökologischer Entlastung und Ressourcenschonung sind diese Wiedereinsatzmöglichkeiten unzweifelhaft sehr unterschiedlich zu bewerten. Eine derartige Bewertung muss aber selbstverständlich auch die notwendigen Vorbehandlungsverfahren umfassen.

Die reale derzeitige Entsorgungspraxis von Schleifschlämmen wird allerdings weitgehend

von den Entsorgungskosten und den abfallrechtlichen Anforderungen bestimmt. Beide Steuerungssignale begünstigen derzeit eher einfache Verwertungen auf vergleichsweise geringem Recyclingniveau. Das abfallrechtlich verankerte Gebot der Hochwertigkeit der Verwertung wird damit nur unzureichend umgesetzt.

Ein Grund für dieses „Vollzugsdefizit“ liegt u. a. in der Unsicherheit der beteiligten Akteure (Erzeuger, „Entsorger“ und Behörden) bei der Beurteilung verschiedener Verwertungsoptionen. So gesehen erscheint hier eine „Hochwertigkeits-“ bzw. Nachhaltigkeitsprüfung sinnvoll, um auf diese Weise eine bessere Begründung für hochwertigere Verfahren zu ermöglichen.

10.2 Vorgehen

Diesbezüglich schon vorliegende Arbeiten zu einer orientierenden Ökobilanz verschiedener Verwertungsoptionen¹⁷⁹ sowie konkrete Erfahrungen aus Einsatzversuchen im Kupolofen¹⁸⁰ wurden deshalb zunächst entsprechend ausgewertet.

Basierend auf diesen Daten wurden die Stoff- und Energieströme verschiedener Verwertungsoptionen computergestützt modelliert. Ziel war es, zu einfachen Modell- und Ergebnisdarstellungen zu gelangen.

Diese Modellierungen dienen auch zur Klärung der Frage, ob zum einen durch computer-gestützte Modellierungen eine rationale zielgerichtete Diskussion unterstützt werden kann, und ob zum anderen durch eine solche Vorleistung der Projektmitarbeiter die Bereitschaft der Partnerunternehmen zur Bereitstellung von (anonymisierten) Unternehmensdaten erhöht werden kann.

Um die Möglichkeiten und Probleme bei der EDV-gestützten Darstellung und Bewertung solcher Entsorgungsverfahren zügig bestimmen zu können, wurden aus der Bandbreite der prinzipiell geeigneten Verwertungsverfahren für Kühlschmierstoff (KSS) behaftete Metallschleifschlämme im ersten Schritt zwei „extreme“ Varianten ausgewählt. Es handelte sich einerseits um den Einsatz dieser Stoffgemische im Kupolofen einer Eisen-Gießerei und zum anderen um die Zumischung in den Rohmaterialstrom eines Zementwerkes.

Für die Kupolofen-Variante konnte auf konkretes Datenmaterial aus entsprechenden Einsatzversuchen beim Partnerunternehmen Keula-Hütte in Lüneburg zurückgegriffen werden. Die entsprechenden Versuche waren dort in den Jahren 1995-96 unter wissenschaftlicher Begleitung des IFG-Institutes für Gießereitechnik GmbH und des ÖKOPOL-Instituts Hamburg durchgeführt worden. Für die Verwertung im Zementwerk standen Daten aus diversen Untersuchungen von ÖKOPOL zum Einsatz unterschiedlichster Abfallstoffe in verschiedenen Zementöfen zur Verfügung.

Auf dieser Datenbasis wurden entsprechende EDV-gestützte Modellierungen entwickelt, die jeweils die CO₂-Emissionen, den Energiebedarf und die Massenströme der Verwertung einer definierten Mengeneinheit Schleifschlamm darstellen und damit einen Vergleich ermöglichen.

10.2.1 Kupolofen

Heißwindkupolöfen werden u. a. zum Aufschmelzen von Schrotten in Eisengießereien eingesetzt. Es handelt sich dabei um eine vergleichsweise robuste Verfahrenstechnik, die Schwankungen auf der Einsatzstoffseite vergleichsweise gut abpuffern kann. Aus diesem Grund, und da die Eisenanteile in den Metallschleifschlämmen hier unmittelbar auf der (Halb-)Fertigproduktebene eingespeist werden können, sind diese Anlagen prinzipiell für eine enge Kreislaufführung der in Frage stehenden Abfallgemische geeignet.

¹⁷⁹ Jepsen, D.; Sander, K.:

¹⁸⁰ Jepsen, D.; Sander, K.:

Um diese Verwertung realisieren zu können, müssen allerdings zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die Schleifschlämme müssen kompaktiert werden, damit sie mit den verfügbaren Aufgabetechniken (Greifbagger) dem Ofen zugeführt werden können.
- Um die Freisetzung von problematischen Luftemissionen zu vermeiden, ist eine deutliche Reduzierung der KSS-Anhaftungen notwendig.

Im untersuchten und modellierten Fall der Einsatzversuche bei der Keula-Hütte wurden diese Voraussetzungen durch eine Brikettierung in einer entsprechenden Hochdruck-Presse und durch einen darauf folgenden Sinterschritt der Briketts in einem Sinterofen erreicht.

Die gesinterten Briketts konnten mit einem Gewichtsanteil von bis zu 20% in die Metallbeschickung des Ofens eingebracht werden. Es ergaben sich die folgenden zu modellierenden Effekte:

Der Einsatz der Briketts bedingt einen höheren Einsatz an Kalkstein und verursacht dadurch eine erhöhte Schlackeproduktion. Zum Betrieb der Brikettpresse und des Sinterofens ist Strom erforderlich, welcher zusätzlich zum normalen Betrieb des Kupolofens verbraucht wird. Abluftseitig ergeben sich trotz der Presse erzielten deutlichen Verringerung der KSS-Anteile geringe zusätzliche Schadstoffemissionen, die jedoch messtechnisch nicht hinreichend erfasst werden konnten. Der Metallanteil der Briketts fließt auf diese Weise in die Herstellung von Gusseisen ein. Durch diese Verwertung der kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämme braucht der entsprechende Metallanteil also nicht neu produziert zu werden. Folglich können die Vor- und Nebenprodukte der eingesparten Metallproduktion in der Bilanz als Gutschrift für diesen Verwertungsweg angerechnet werden.

Zu erwähnen ist, dass die dem Modell zugrunde liegenden Daten auf einer kurzen Versuchsphase beruhen. Dabei fand das Sintern nicht unter den gewünschten optimalen Bedingungen statt, da die Erhitzung der Briketts nicht unter Ausschluss von Sauerstoff stattfand, was zu einer ungleichmäßigen Erwärmung der Briketts und z. T. zum Verbrennen des Ölanteils unter offener Flamme führte. Dies führte zu einem stark erhöhten Eisenoxidanteil in den gesinterten Briketts, was sich wiederum als höheres Schlackeaufkommen bemerkbar machte. Auch die emissionsseitigen Effekte konnten aufgrund der schwankenden Betriebszustände und der in den meisten Versuchsphasen nur geringen Schleifschlammzugaben nur ungenügend quantifiziert werden, so dass die Emissionen nicht zu weiteren Bewertungen herangezogen werden konnten.

In der folgenden Abbildung ist das Stoffstrommodell der „Verwertung von kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämmen in einem Heißwindkupolofen“ dargestellt. Zu erkennen sind die Inputstellen (Kreise mit einem senkrechten Strich auf der linken Seite), an denen Stoffe und Energie in das Modell hineinfließen. Diese werden in den Transitionen (Quadrate) entsprechend der modellierten Prozessbeschreibung umgewandelt. An den Outputstellen (Kreise mit einem senkrechten Strich auf der rechten Seite) laufen dann Reststoffe und die Produkte auf. Zur Berücksichtigung der vor- und nachgelagerten Prozessketten sind die „Stromerzeugung“ und die „Eisen- und Stahlproduktion“ separat modelliert.

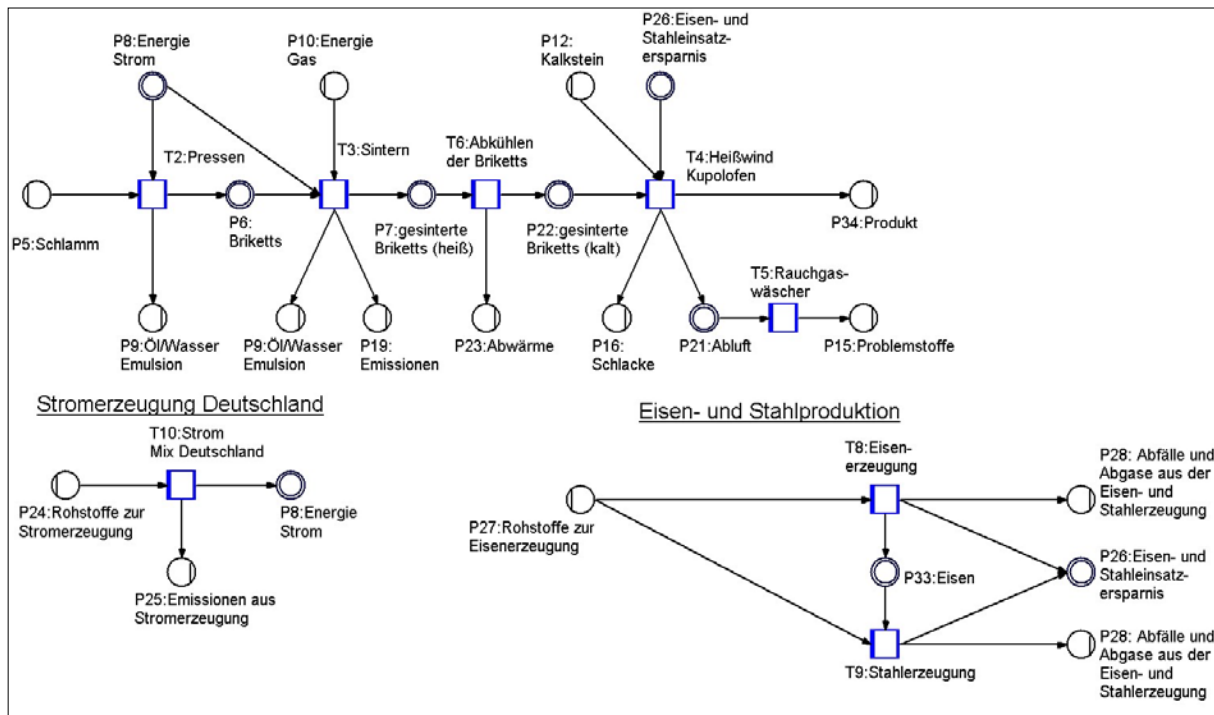


Abbildung 48_ Stoffstrommodell der Verwertung von kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämmen in einem Heißwindkupolofen

10.2.2 Zementofen

Aufgrund der speziellen Prozessbedingungen im Zementofen (sehr hohe Feuerungstemperaturen und basisches Milieu in der langen Abgasstrecke) können bei der Verwertung von kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämmen in einem Zementofen neben den Feststoffanteilen (Metalle und Schleifscheibenabrieb) auch die KSS-Anhaftungen schadlos verwertet werden. D.h. es muss keine Vorabscheidung der KSS-Anteile erfolgen.

Bei der Verwertung ergeben sich die folgenden Effekte: Zur Beimischung des Schleifschlammes wird zusätzlich Strom verbraucht. Der Brennstoffbedarf des Ofens kann dagegen zu einem Teil aus dem Ölanteil des kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlammes erbracht werden. Diese Brennstoffersparnis wird noch zusätzlich erhöht durch die bei der Oxidation des Eisenanteils freiwerdende Energie. Daraus resultiert ein geringerer Kohlestaubeinsatz bei der Zementproduktion durch die Verwertung von Schleifschlämmen. Es muss folglich weniger Kohlenstaub produziert werden, was wiederum eine Reduzierung des Stromverbrauchs beim Mahlen der Kohle im Zementwerk verursacht.

Der Bedarf an eisenoxidhaltigen Materialien in der Zementfertigung kann durch den Fe-Anteil der kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlammes gedeckt werden. Deren nicht-oxidierte Eisenanteile oxidieren bei den in einem Zementofen herrschenden Prozessbedingungen überwiegend und erfahren somit eine entsprechende Gewichtszunahme.

Im Einzelnen ist das vereinfachte Modell der „Verwertung von kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämmen in einem Zementofen“ in der folgenden Abbildung dargestellt.

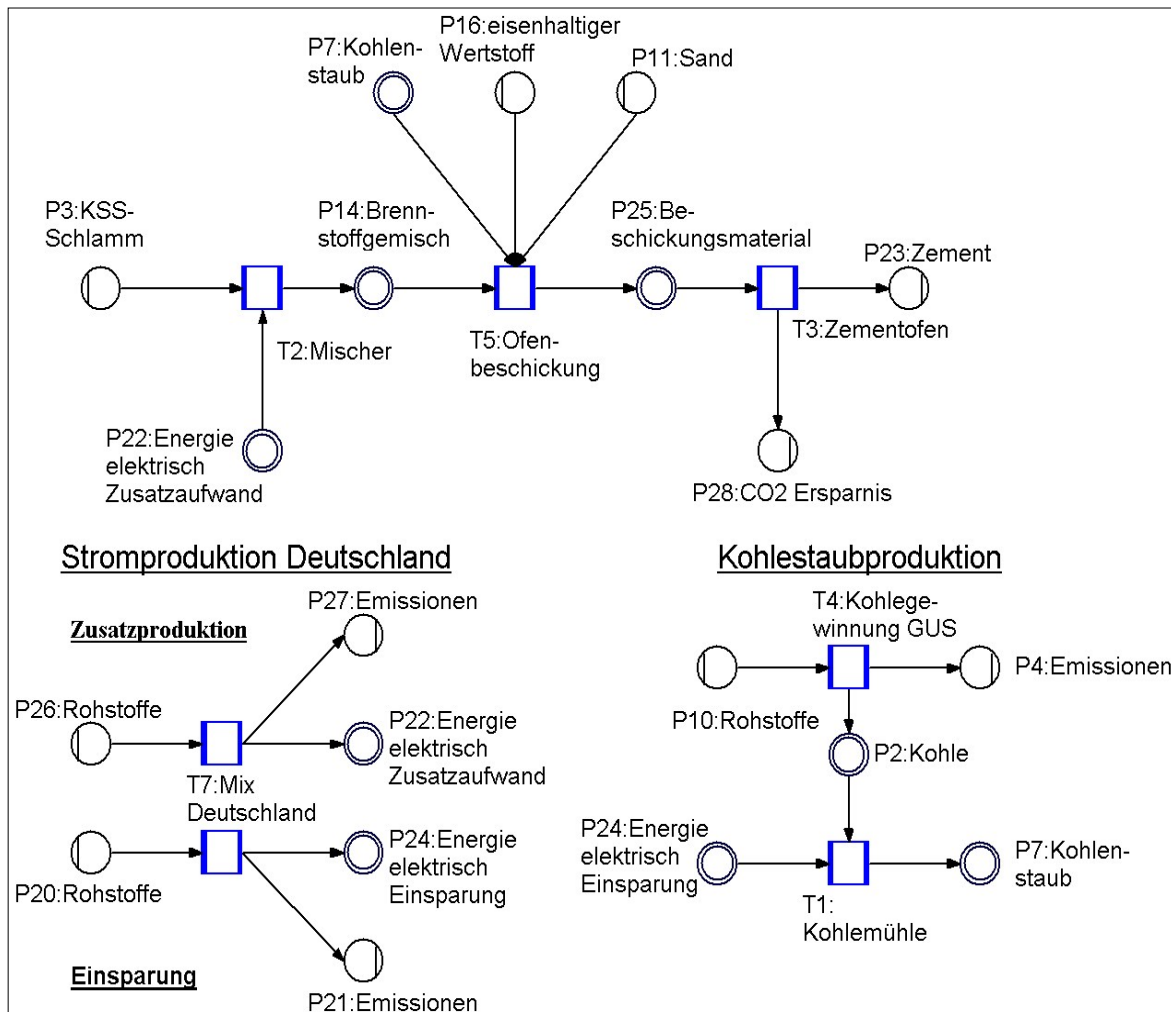


Abbildung 49 Stoffstrommodell der Verwertung von kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämmen in einem Zementofen

10.2.3 Modell und Bilanzgrenzen

Bei dem Entwurf der Modelle wurden die Modellierungs- und Bilanzierungsgrenzen entsprechend dem Modellierungsziel gewählt. Es wurden also nur diejenigen Prozesse modelliert, die durch die Verwertung der kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämme beeinflusst werden und nur die Stoffe, deren mengenmäßiger Einsatz durch die Verwertung der kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämme verändert bzw. erst verursacht werden.

Beispielsweise wird im Kupolofenmodell der Kalkstein abgebildet, weil die erforderliche Menge durch den Einsatz der Briketts ansteigt, der Kokseinsatz wird im Gegensatz dazu nicht abgebildet, weil dieser sich nicht verändert. Die Anzahl der Stoffe, die mit ihrer Vorkette modelliert wurden, sind auf das Notwendige eingegrenzt worden, um den Umfang der Modellierung in einem bearbeitbaren Rahmen zu halten. Die Entscheidung, welche Vorkette einbezogen wurde, fiel aufgrund des jeweiligen Anteils der einzelnen Stoffe an der Bilanz bzw. aufgrund des jeweiligen Gefährdungspotentials. So wurden beispielsweise die Energieströme zur Kohlegewinnung mitbetrachtet, der hierfür notwendige Wassereinsatz jedoch nicht.

Eine schwierige Modellierungsfrage ergab sich bei den durch den Schleifschlammeinsatz ggf. substituierten Eisenoxidträgern im Zementofen. Wenn in den natürlichen Rohstoffen der Zementwerke nicht ausreichend Eisenoxide enthalten sind, werden hier meist entsprechende Abfallstoffe, wie Filterstäube aus Metallhütten und Stäube aus der Eisenerzverladung eingesetzt. Es stellt sich somit die typische Frage nach der Bilanzgrenze mit Blick auf die

Vorketten-Lasten dieser substituierten Abfallströme. Aus Gründen der vermuteten geringen Relevanz der entsprechenden Gutschriften haben wir uns gegen ein Einbeziehen Vorkette entschieden.

10.2.4 Ergebnisse

Neben der Darstellung der einfachen Modellstruktur, wie in der Abbildung 48 und der Abbildung 49 können auch die Stoffströme (in kg) oder die Energieströme (in kJ) in Form von Sankey-Diagrammen dargestellt werden (vgl. Abbildung 50 bis Abbildung 53). Die Breite der Pfeile gibt in Sankey-Diagrammen maßstabsgerecht die Mengenverhältnisse wieder. Die unterschiedlichen Stoffarten werden i. d. R. durch verschiedene Grautöne charakterisiert und in einer Legende dargestellt. In dem gleichen Grauton sind die Stoffe zusammengefasst, bei denen eine Differenzierung für die hier getroffene Aussage nicht relevant ist. Im Folgenden sind für beide Verwertungswege (Kupolofen und Zementwerk) die Massen- bzw. Energieströme getrennt dargestellt.

Bei der Betrachtung der Sankey-Darstellungen des Kupolofenmodells wird deutlich, dass die größten Auswirkungen (Massenströme und Energie) der beiden Verwertungswege für kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämme sich gar nicht im Bereich der eigentlichen Verwertung niederschlagen, sondern in den Vorketten zur Eisenherstellung. Dort sind maßgebliche Einsparungen darstellbar.

Durch die Verwertung der kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämme wird dort in etwa die dreifache Menge an Massenströmen eingespart. Bei der Energie stehen dem zusätzlich erforderlichen Aufwand durch die Verwertung Einsparungen gegenüber, die in etwa 30 mal größer sind.

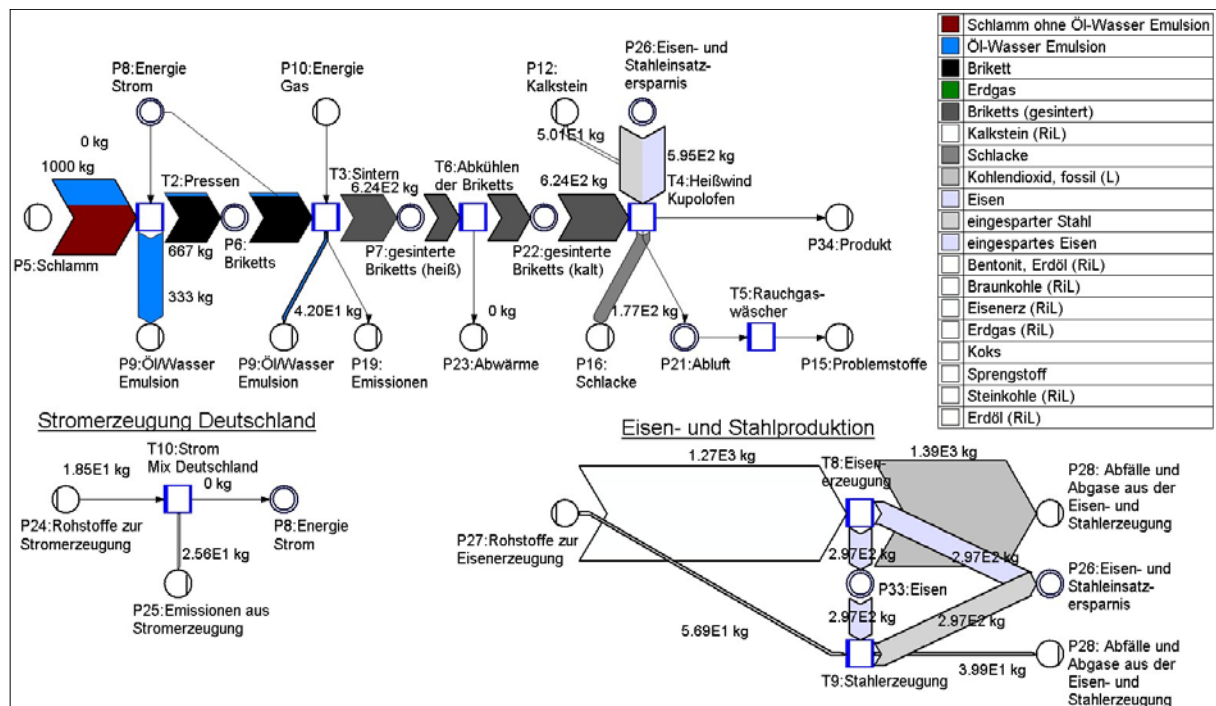


Abbildung 50_Massenströme im Kupolofen

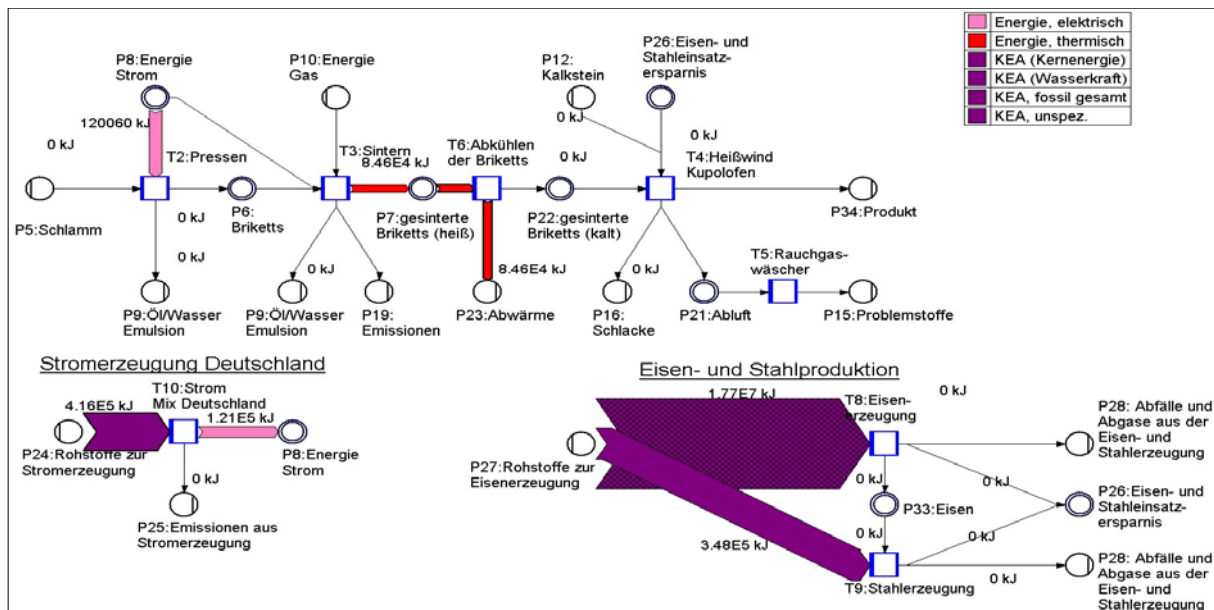


Abbildung 51_Energieströme im Kupolofen

Bei der Betrachtung der Sankey-Darstellungen des Zementofenmodells ist zu erkennen, dass hier die überwiegenden Massenströme bei der Verwertung der kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämme anfallen und nicht in den Vor- bzw. Nachketten. Bei den Energieströmen überwiegt jedoch der Energieaufwand in der Vorkette. In diesem Fall ist der Energieaufwand zur Gewinnung der Kohle der relevanteste Energiestrom, da die beiden Energieströme zur Stromgewinnung sich aufheben. Dies entsteht dadurch, dass es sich bei dem einen um eine Lastschrift und bei dem anderen um eine Gutschrift in fast identischer Höhe handelt.

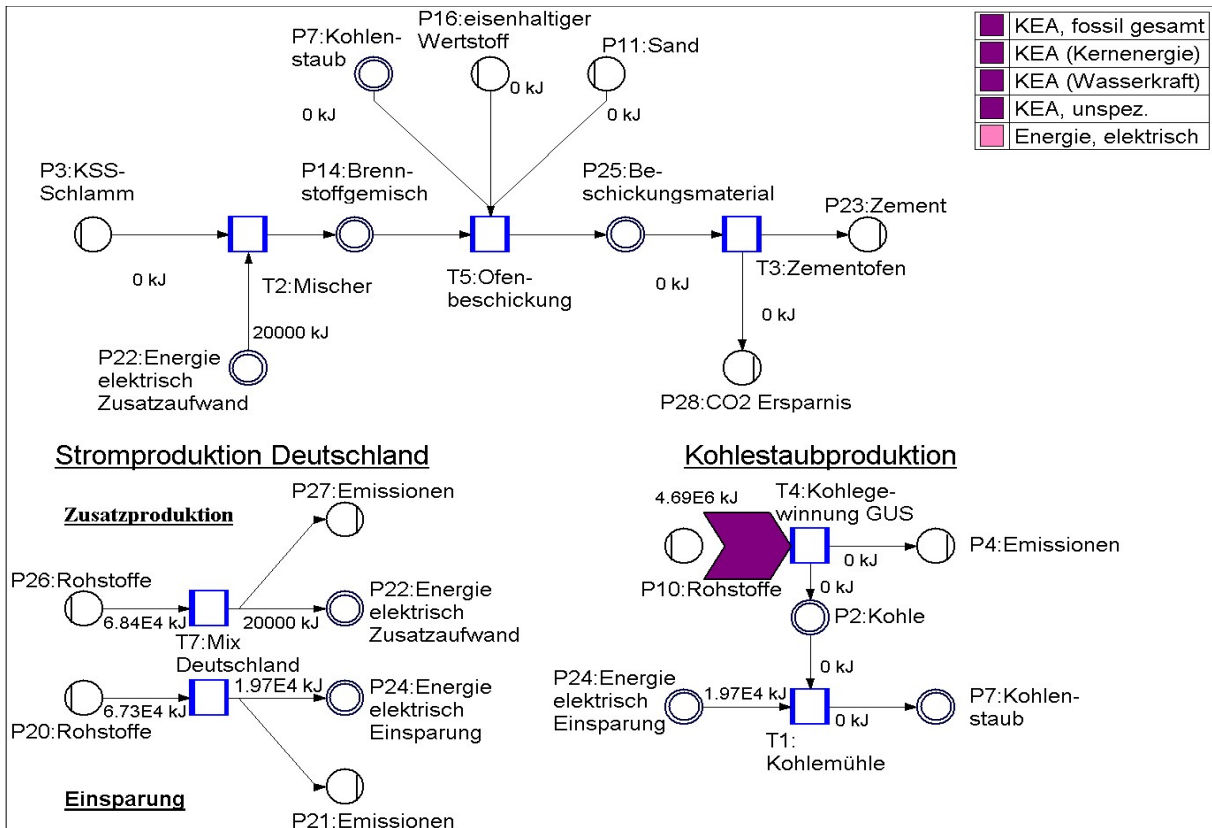


Abbildung 52_Energieströme im Zementofen

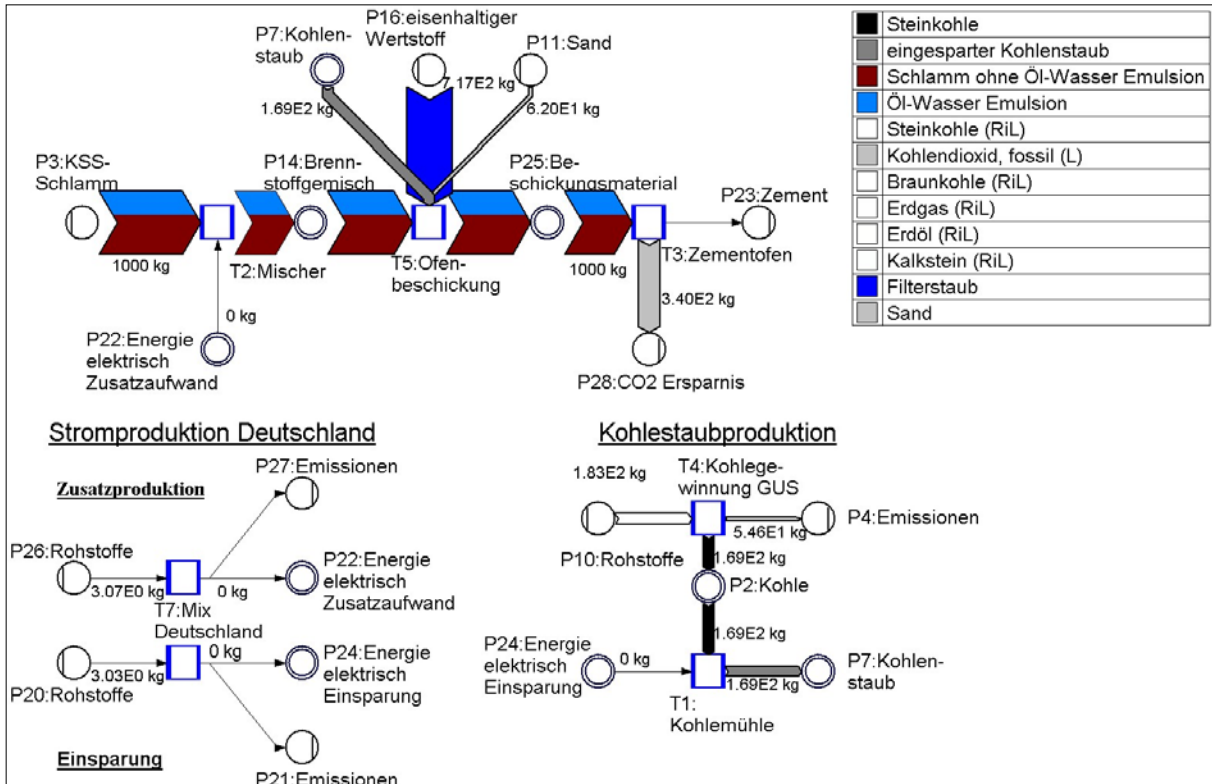


Abbildung 53_Massenströme im Zementofen

10.2.5 Bewertungssystem

Methoden

Bei der zur Modellierung verwendeten Software handelte es sich um Umberto 3.6. Ein Ziel bei der Modellierung war das Darstellen der Ersparnisse von Stoffen und Energie, die aus der Verwertung der kühl-schmierstoffhaltigen Metallschleifschlämme resultieren. Diese Ersparnisse sollten dann für verschiedene Szenarien (Modelle) vergleichbar gemacht und dargestellt werden. Da es allerdings mit Umberto nicht möglich ist, negative Stoff- oder Energieströme abzubilden, musste hier ein Weg gefunden werden, um den Vergleich trotzdem zu bewerkstelligen. Die schließlich realisierte Modellierungsmethode basierte auf dem Einsatz eines Bewertungssystems, das die einzelnen Stoff- und Energieströme als positiv (zusätzliche Verbräuche, Emissionen und dergl.) oder negativ (eingesparte Verbräuche, Emissionen und dergl.) bewertet und bilanziert, wodurch eine Verrechnung der Ersparnisse möglich wurde.

Einen bewertenden Vergleich der Modelle machte erst dieses Bewertungssystem möglich, welches ausgewählte Stoffe der Sachbilanz berücksichtigt. Allerdings musste diese Differenzbildung der Einzelbilanzen jeweils in gesonderten Arbeitsschritten unter Verwendung zwischengespeicherter Werte erfolgen, so dass keine unmittelbare (zeitgleiche) Ergebnisverfolgung von Veränderungen in einzelnen Prozessparametern erfolgen konnte.

Für die im Folgenden dargestellten Vergleiche wurden die CO₂-Emissionen, der Energiebedarf und die verursachten Massenströme (ohne (Kühl-)Wasser) ausgewählt. Die Datenlage ließ keinen Vergleich von weiteren Wirkungskategorien zu. Insbesondere der Vergleich der toxikologisch relevanten Emissionen wäre allerdings wichtig, um zu einer umfassenderen vergleichenden Bewertung zu kommen.

Tabelle 32_Übersicht der Bewertungsergebnisse der beiden „Vergleichsszenarien“

◆ CO ₂ Produktion	
▣ Zementofen 6 1t Schlamm 33.6H2O 4.4Öl Versuch 3	-394.74
▣ Kupolofen 6 1t Schlamm 50% 20% Versuch 3	-1408.48
◆ Energieaufwand	
▣ Zementofen 6 1t Schlamm 33.6H2O 4.4Öl Versuch 3	-4695478.11
▣ Kupolofen 6 1t Schlamm 50% 20% Versuch 3	-17556290.32
◆ Massenbilanz	
▣ Zementofen 6 1t Schlamm 33.6H2O 4.4Öl Versuch 3	-1962.62
▣ Kupolofen 6 1t Schlamm 50% 20% Versuch 3	-50785.86

Ergebnisse

Die Zahlen verdeutlichen ebenso wie die folgenden Chartdarstellungen, dass die Verwertung der kühl-schmierstoffhaltigen Metallschleifschlämme im Heißwindkupolofen deutlich größere Einsparungen zur Folge hat, als dies im Zementofen der Fall ist. Dies ist zum größten Teil das Resultat der Einsparungen in den Vorketten zur Eisengewinnung.

Die energetische Verwertung des Ölanteils im Zementofen hat dort einen energetischen Vorteil der Verwertung im Zementofen zur Folge. Bei der Verwertung im Kupolofen ist der energetische Gewinn durch die vermiedene Eisenproduktion jedoch wesentlich größer. Für das beim Kupolofen mechanisch abgeschiedene Öl wurde zudem keine energetische oder stoffliche Gutschrift berücksichtigt (vgl. Abbildung 55).

Analog hierzu wurde auch bei den CO₂-Emissionen der Vorteil einer energetischen Verwertung des Öls im Zementofen durch die Einsparung aus der Eisengewinnung im Kupolofenmodell übertroffen (vgl. Abbildung 54).

Auch bei den Massenströmen wird bei der Schleifschlammverwertung im Kupolofen eindeutig weniger Masse bewegt, als bei der Verwertung im Zementofen (vgl. Abbildung 56).

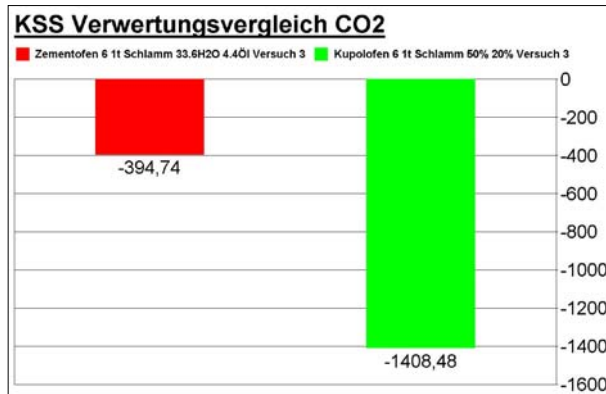


Abbildung 54_KSS Verwertungsvergleich hinsichtlich CO₂-Emissionen

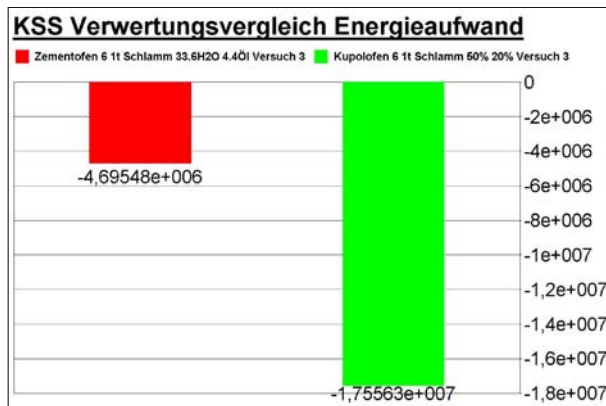


Abbildung 55_KSS Verwertungsvergleich hinsichtlich Energieaufwand

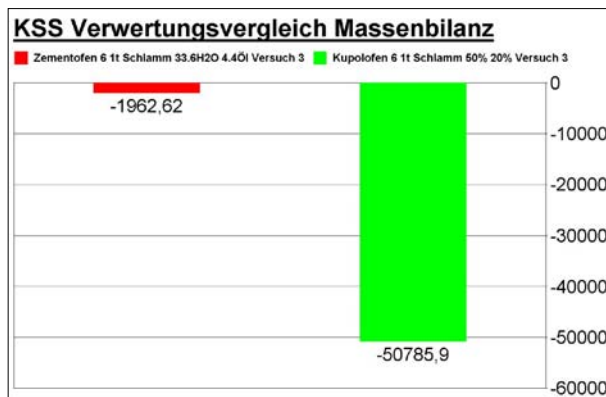


Abbildung 56_KSS Verwertungsvergleich hinsichtlich Massenbilanz

Die Modellierung der beiden Referenzszenarien hat zunächst einmal gezeigt, dass sich die EDV-gestützte Arbeitsweise mit folgenden Einschränkungen realisieren lässt:

- Wie bei allen ökobilanzierenden Vergleichen ist die Frage der Datenverfügbarkeit und die damit verbundene Problematik, gleichartige und qualitativ gleichwertige Daten für alle relevanten Prozessschritte zu erhalten, auch hier von zentraler Bedeutung.
=> Frage nach der optimalen Aufwand- und Nutzen-Relation

- Die Übersetzung der realen Verfahrensschritte in die Beschreibungslogik der Computer-Modellierung erfordert die enge Zusammenarbeit zwischen einem prozess-technisch versierten Praktiker und einem Programmierer.
=> Frage nach Verfügbarkeit von angemessener „Übersetzungsleistung“
- Die Modellierungen sind aufgrund ihrer Komplexität nur bedingt zum spielerischen Variieren der Parameter geeignet. Die Erwartungen, durch ein „Herumschrauben“ an solchen Modellen, also durch das mehr oder minder ungezielte Verändern verschiedener Prozessparameter, dem Benutzer ein direktes „Gefühl“ für die Zusammenhänge vermitteln zu können, ist nur sehr beschränkt einlösbar.
=> Frage nach den direkten Rückkopplungen im Modell sowie zwischen Modellierer und ‚Anwender‘
- Die stark schematisierte Darstellung der Modelle erschwert manchem Betriebspraktiker das „Wiedererkennen“ der Wirklichkeit.
=> Frage nach der optimalen Darstellung bzw. Darstellbarkeit

Trotz dieser Einschränkungen erschien es uns als sinnvoll und Erfolg versprechend, den eingeschlagenen Weg weiter zu verfolgen.

10.3 Sinterverfahren der Firma Oesterreich

Die in der Region Hamburg ansässige Firma RES Oesterreich hatte in einer Pilotanlage mit Investitionsunterstützung des Bundeslands Schleswig-Holstein die Verwertung von eisenhaltigen Spänen, Schleifschlämmen und Zunder realisiert. Das Produkt ist „Fertigsinter“ und kann ohne weitere Aufbereitung als Rohstoff zur Stahlherstellung in den Hochofenprozess eingespeist werden. Gesintert werden Späne und Schleifschlämme aus der Metallbearbeitung sowie Walzzunder auf der Stahlherstellung. Die Schleifschlämme werden mit dem Zunder, Wasser, Rückgut und weiteren Zuschlagsstoffen zu einer „Mischung“ verarbeitet. Diese Mischung wird auf einem offenen Rost mit einer Gasflamme entzündet bzw. gesintert. Dabei wird das anhaftende Öl teilweise verdampft und teilweise verbrannt. Die Abgase werden abgesaugt und in einer aufwändigen Abluftreinigung gereinigt. Dabei wird auch das bisher nur verdampfte Öl kondensiert, abgetrennt und der Altölaufbereitung bzw. Entsorgung zugeführt. Der Roh-Sinter wird nach Korngrößen klassiert in Rückgut, Rostbelag (zum Schutz des Rostes vor Korrosion) und Fertigsinter. Der Fertigsinter kann direkt zum Hochofen transportiert werden.

Unglücklicherweise war das Unternehmen noch während der Kooperationsphase gezwungen, Insolvenz zu beantragen, in deren Verlauf die Anlage dann schließlich stillgelegt wurde. Der Inhaber und Entwickler des Verfahrens führt die Insolvenz auf gravierende Fehler des für die Planung und Investitionskostenberechnung beauftragten Ingenieurbüros zurück. Infolge dessen wurden der Investitionsbedarf und die benötigte Investitionsfördermenge um etwa die Hälfte zu niedrig angesetzt. Aus dieser Unterfinanzierung habe der Betrieb sich nicht befreien können. Ein wesentlicher Grund für diese Entwicklung lag aber wohl auch in zahlreichen Betriebsstillstandsphasen und in Bränden im Schleifschlammager.

10.3.1 Modellierung

Mit der Stoffstrommodellierung bei diesem Partnerunternehmen waren ursprünglich zwei *Ziele* verfolgt worden. Zum einen bestand das Interesse, dieses spezielle Verwertungsverfahren besser kennen zu lernen, zu bewerten und ggf. gemeinsam mit dem Betreiber nach ökologischen und ökonomischen betrieblichen Optimierungspotenzialen zu suchen. Zum anderen sollte dieses Verfahren mit den schon modellierten Verfahren Kupolofen und Zementwerk verglichen werden. Beide Ziele wurden aufgrund der Insolvenz nur bedingt erreicht. Die gewählte Auswertung bzw. Ergebnisdarstellung bezogen sich auf die „betrieblichen Stoffströme“ und den kumulierten Energieaufwand (KEA) zur Sinterherstellung. Die Modellstruktur und die erhobenen Daten waren auf diese Auswertungen optimiert, d. h., es wurden z. B. keine toxikologisch relevanten Daten

erhoben. Der Grund hierfür lag keineswegs in einer Geringschätzung derartiger weiter gehender Wirkungskategorien, sondern allein in der notwendigen Begrenzung des Aufwandes für die Datenerhebung und Modellierung.

Um den sensiblen Bereich der *Betriebsdatenerhebung* und -verwendung mit der notwendigen Behutsamkeit zu behandeln, wurde eine iterative Modellentwicklung durchgeführt. D. h., dass schrittweise jeweils nur relativ wenige Daten und Informationen beim Unternehmen erfragt wurden. Diese Daten wurden zur Modellierung verwendet und die ersten Ergebnisse (Modellstruktur, Differenzierung der Prozesse) wurden dann im Unternehmen präsentiert. Durch die Darstellung der Ergebnisse und das Verdeutlichen von Datenlücken konnte dort wiederum die Motivation zur weiteren Freigabe von Daten und zur eigenständigen Datenerhebung (bzw. Auswertung und Aggregation) geweckt werden.

Im Zuge der Insolvenz konnten dann zwar einerseits vorhandene Daten leichter zugänglich gemacht werden, andererseits war eine Datenerhebung durch Messungen im Betrieb nicht mehr möglich. Das Modell ist daher nur wenig differenzierter als eine Input/Output-Betriebsbilanz und konnte nicht, wie geplant, noch weiter nach Prozessen differenziert werden.

Im Einzelnen standen aus dem Jahr 2000 folgende Daten zur Verfügung: LKW-Typen, Transportentfernungen und Mengen; Produktmenge; Betriebsverbräuche für Strom, Erdgas, Diesel und Wasser; Mengen von Abwasser, festen und flüssigen Abfällen sowie Abluft. Weiterhin waren die Prozessdaten (Massenverhältnisse) für den Sinterprozess und die Herstellung der Mischung bekannt. Für die (Umwelt-)Kostenrechnung waren die Preise der Rohstoffe bzw. die Erlöse für ihre Annahme und die Erlöse des Produkts bekannt, sowie die durchschnittlichen Personalkosten und die ungefähren Investitionskosten.

Die *Bilanzgrenzen* wurden zum einen für alle mengenmäßig relevanten Stoffmengen um den Betrieb gezogen. Zusätzlich wurden die Aufwendungen für den Transport der Rohstoffe und des Produkts modelliert. Für die Energieträger Strom, Gas und Diesel wurden die Vorketten zur Bereitstellung der Energie von der Lagerstätte des Rohstoffs bis zum Betrieb in das Modell aufgenommen (vgl. Abbildung 57).

Ausgegrenzt wurden die festen, flüssigen und gasförmigen Emissionen, da sie für die geplante Auswertung des kumulierten Energieaufwands und die Darstellung der Stoffströme des Betriebs nicht relevant waren. Aus toxikologischer Sicht sind sie jedoch vermutlich sehr bedeutsam und müssen für eine vollständige (Öko-)Bilanz auf jeden Fall berücksichtigt werden.

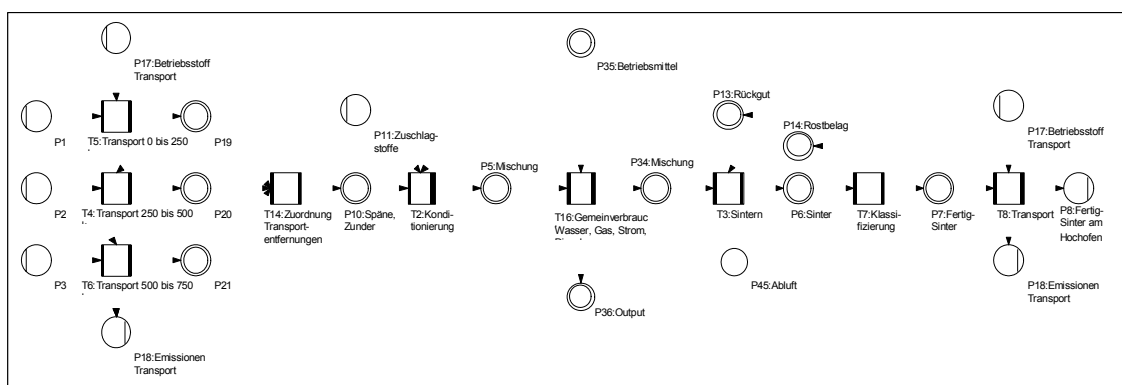


Abbildung 57_ Modellstruktur des Sinterverfahrens der Firma Oesterreich

Die Modellstruktur beinhaltet (von links nach rechts in Abbildung 57) die Transporte der Rohstoffe, differenziert nach drei Entfernungsklassen (bis 250 km, 250 bis 500 km, 500 bis 750 km). Die Rohstoffe werden in der Konditionierung mit Zuschlagstoffen (mengenrelevant ist nur Wasser) zur Mischung verarbeitet. Die folgende Transition (Quadrat, T16) bildet den

nicht auf die einzelnen Prozesse aufschlüsselbaren Gemeinverbrauch von Strom, Wasser, Erdgas und Diesel ab. Über die Prozesskenntnis ist jedoch folgende Zuordnung schlüssig: Strom wird vermutlich zum überwiegenden Teil für die Abluftreinigung benötigt, das Erdgas dient zum Sintern und der Diesel für den Radlader zur Beschickung der Anlage und zum Verladen des Fertigsinters. Nur der Wasserverbrauch ist nicht überwiegend einem Prozess zu zuschreiben. In dem darauf folgenden Klassifizierungsprozess sind zwei Kreisläufe modelliert. Zum einen fließt das Rückgut zum Konditionierungsprozess zurück und zum anderen wird der Rostbelag beim Sintern benötigt. Abschließend wird der Fertigsinter zum Hochofen transportiert.

In den beiden Ansichten aus Abbildung 58 ist links die Modellstruktur der Vorketten für die Energieträger abgebildet und rechts sind die betrieblichen Energieumwandlungsprozesse modelliert. Für beide Bereiche wurde auf vorhandene Module aus der Umbertobibliothek zurück gegriffen, die auf GEMIS¹⁸¹ Daten beruhen. Auch die Transportprozesse wurden aus der Bibliothek entnommen und über Parameter an den spezifischen Fall angepasst. Die Energieumwandlungsprozesse wurden für den Gasbrenner im Sinterprozess durch einen entsprechend dimensionierten „Gasherd“, der Radlader wurde durch einen „generischen Dieselmotor“ nachgebildet. Diese Annäherungen dienen zum Vervollständigen der Energiekette und sind für den hier interessierenden KEA bzw. die entsprechenden betrieblichen Stoffströme ausreichend.

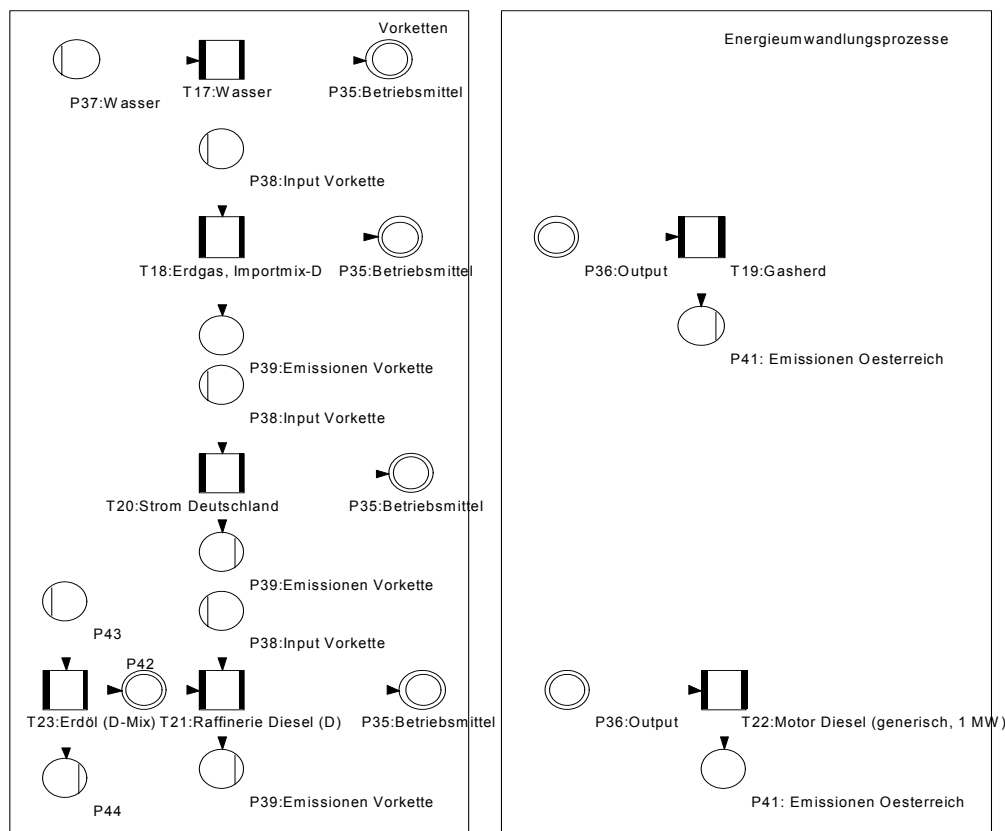


Abbildung 58 „Vorketten für die Energieträger“ (links) sowie „Betriebliche Umwandlungsprozesse“ (rechts)

Die Kostenrechnung wurde nur für die Roh- und Betriebsstoffe sowie für die Produkte durchgeführt. Wegen der Insolvenz des Betriebes schien die geplante Ausweitung auf Personalkosten, Miete und Abschreibung nicht mehr sinnvoll.

¹⁸¹Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (<http://www.oeko.de/service/gemis/>)

10.3.2 Ergebnisse

Die Auswertung erfolgte mit Blick auf die betrieblichen Massenströme, den kumulierten Energieaufwand (KEA) und die Kosten bzw. Erlöse für Roh- und Betriebsstoffe sowie den Fertigsinter.

Die Massenströme sind in Form eines Sankey-Diagramms dargestellt (vgl. Abbildung 59). Die Breite der Pfeile gibt die Verhältnisse der Massen proportional wieder. In der Mitte des linken Kastens (Vorketten) ist zu erkennen, dass die Stromerzeugung einen besonders großen Massenstrom verursacht. Der Grund sind jedoch große Mengen an Kühl- und Prozesswasser, die keine größere ökologische Relevanz haben. Ohne den Wasseranteil liegt der Massenstrom zur Stromerzeugung bei etwa 10 % der Masse des produzierten Fertigsinters.

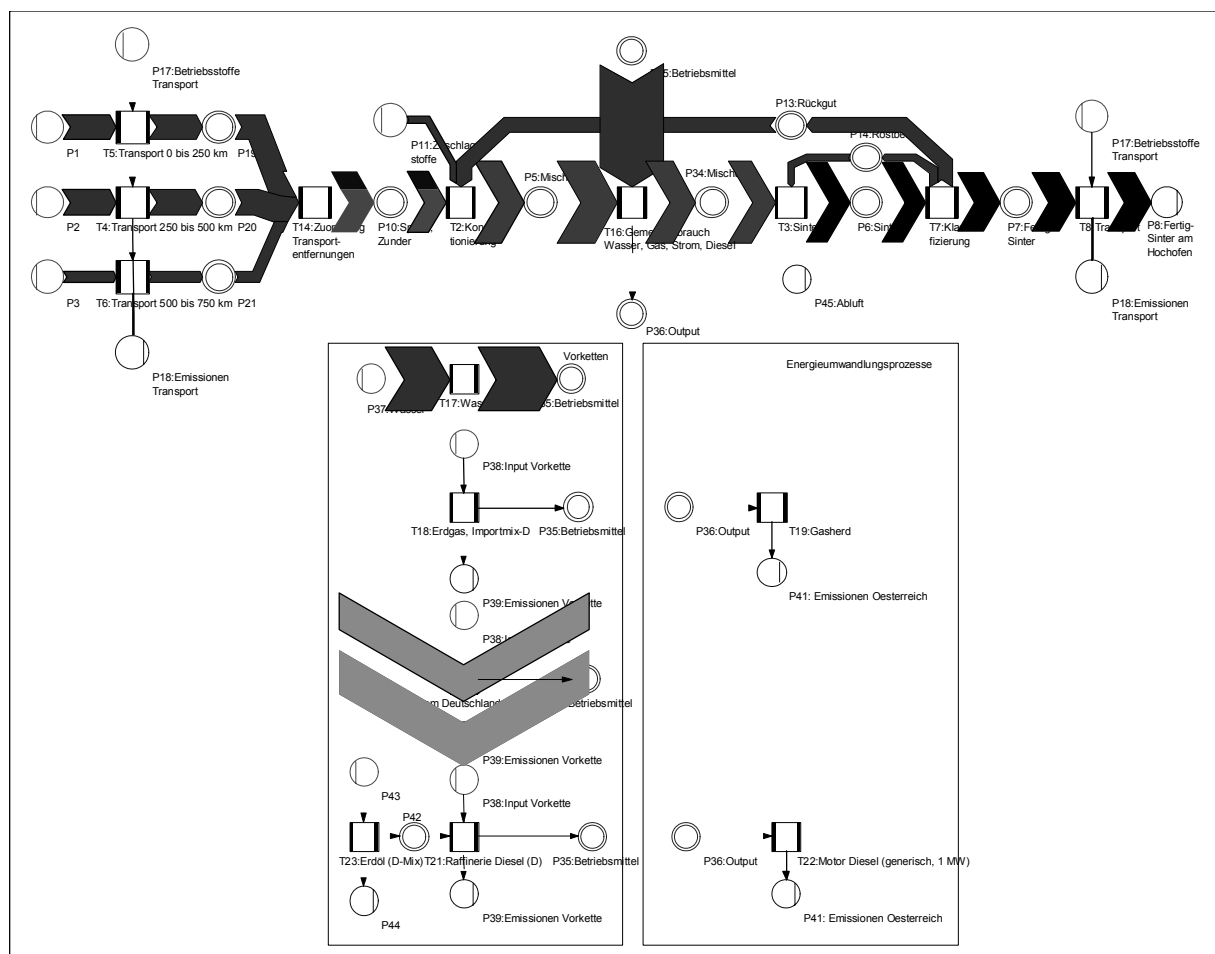


Abbildung 59_ Sankey Diagramm der Stoffströme (Massen)

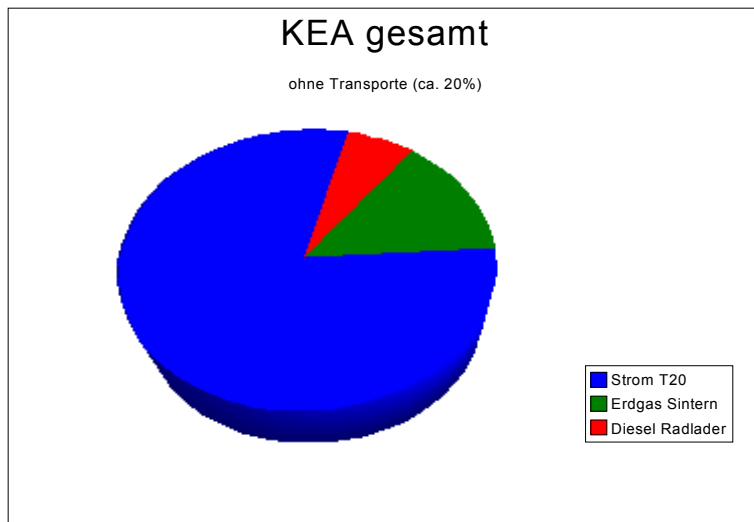


Abbildung 60_Gesamter kumulierter Energieaufwand (KEA)

Bei der Auswertung des KEA und der Materialkosten (vgl. dazu die Abbildung 61) zeigte sich, dass jeweils etwa Dreiviertel der Summen auf den Stromverbrauch zurückzuführen waren. Die wesentlichen Ursachen für den hohen Strombedarf dürften nach Gesprächen mit Mitarbeitern der Firma bei der Abluftreinigung liegen. Die Prozessführung der Abluftreinigung ist bei dieser Pilotanlage „gewachsen“ und lässt von daher große Optimierungspotenziale bei einer Neukonzeption und bedarfsgerechten Steuerung vermuten.

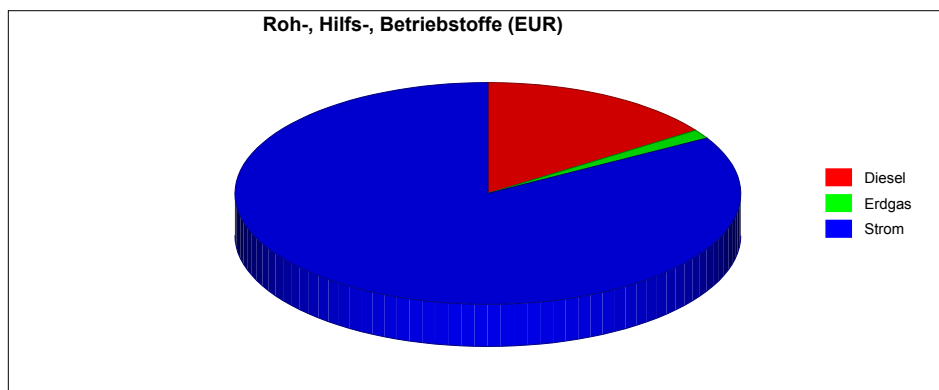


Abbildung 61_Kosten für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe

Auch bei den Transporten, die ca. 20 % des KEA verursachen, ist eine Optimierung über die Transportmittelwahl und die Entfernungen möglich. Aus Gründen der leichten Vergleichbarkeit sind die Transporte nicht in dem KEA-Diagramm dargestellt.

Ein Vergleich mit den Verwertungspfaden im Kupolofen und Zementwerk konnte aufgrund der unterschiedlichen Datenlage leider nicht mehr wie ursprünglich geplant durchgeführt werden.

11 Optimierte Kühlschmierung bei der spanenden Metallbearbeitung - Ansätze auf der Prozessebene

11.1 Ausgangslage

In spanenden Metallbearbeitungsprozessen (sowohl mit geometrisch bestimmter als auch mit geometrisch unbestimmter Schneide) werden heutzutage überwiegend Kühlschmierstoffe (KSS) als Hilfsstoffe eingesetzt. Mit diesem Hilfsstoffeinsatz werden verschiedene Zwecke verfolgt:

- Verminderung des Reibwiderstandes und damit Verringerung von Energieverbrauch und Wärmeentwicklung sowie eine deutliche Standzeitverlängerung der Werkzeugschneiden;
- Aufnahme und Abtransport der Wärme aus der direkten Schneidzone;
- Verbesserung der Spanabfuhr.

Diesen beabsichtigten, positiven Wirkungen des KSS-Einsatzes stehen eine Reihe negativer Effekte gegenüber:

- Gesundheitsbelastungen der Mitarbeiter, insbesondere Gefahr von Nebelbildungen bzw. lungengängigen Feinsttröpfchen sowie Hautreizungen;
- zusätzliche Hilfsstoffkosten und permanenter Aufwand zur Standzeitkontrolle und Pflege der KSS-Bäder;
- Maschinentechnischer Aufwand durch Zusatzeinrichtungen für die KSS-Bevorratung, -Zuführung, -Rückführung und -Reinigung;
- Verunreinigung der Werkzeugmaschinen, der Maschinenumgebung und der Produkte durch KSS bzw. KSS-Nebel, was zu entsprechendem Reinigungsaufwand führt;
- Zusätzlicher ökonomischer und ökologischer Entsorgungsaufwand für verworfene KSS-Bäder und Filtermaterialien;
- Deutlicher Zusatzaufwand bei der Entsorgung von Bearbeitungsspänen und –schlämmen durch die anhaftenden KSS-Rückstände;
- Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen.

Aufgrund der technologischen Entwicklung insbesondere bei Werkzeugwerkstoffen, aber auch in Hinblick auf Schneidengeometrien und Maschinengeschwindigkeiten, besteht mittlerweile die prinzipielle Möglichkeit, hochwertige Schneidoperationen auch mit drastisch verringertem bzw. ohne KSS-Einsatz zu realisieren.

Begrifflich wird unterschieden zwischen der Trockenbearbeitung, die vollständig auf den Einsatz von KSS verzichtet, und der Minimalmengenschmierung (MMS), die durch eine sehr exakte Dosierung und gezielte Zuführung nur soviel KSS direkt an die Schneidstelle führt, wie dort benötigt wird. Die KSS verdampfen dabei praktisch vollständig. Mit Blick auf die Vermeidung der vorstehend skizzierten negativen Effekte des KSS-Einsatzes sind beide Technologien als weitgehend gleichwertig anzusehen¹⁸².

Obgleich diese Technologien im Grundsatz bereits seit etlichen Jahren verfügbar sind und sich die benannten Vorteile prinzipiell realisieren lassen, werden sie bislang nur bei wenigen, zumeist großindustriellen, Pilotbetrieben in größerem Maßstab zur Anwendung gebracht. Die Gründe für diese eher zögerliche Durchsetzung sind vielschichtig.

¹⁸² Referenzuntersuchungen (wie: Eyerer 1997 oder Toussaint, Michler, 1999) zeigen dies deutlich

Anzuführen sind hier u. a. erhöhte (maschinen-) technische Anforderungen:

- Die Werkzeugmaschinen müssen hinsichtlich Schnittgeschwindigkeit und KSS-Zuführungsmöglichkeiten (bei MMS) bestimmte Mindestanforderungen erfüllen.
- Die Werkzeugkosten liegen teilweise signifikant über denjenigen von traditionellen Werkzeugen, so dass insbesondere bei Vorhandensein umfangreicher Werkzeugsätze relevante Umrüstkosten entstehen.¹⁸³

Daneben gibt es werkstückbezogene Schwierigkeiten: Einige Bearbeitungsprozesse sind bislang noch nicht trocken durchzuführen. Beispielhaft benannt sei hier die Fertigung von Passungen an besonders dünnwandigen Bauteilen. Hier ergeben sich durch die entsprechenden thermischen Belastungen der Bauteile und in der Folge Abmaßänderungen Probleme. Andere Fertigungsprobleme liegen im Bereich der Bearbeitung hochlegierter Stähle. Gerade bei flexiblen Fertigungsstationen kann deshalb vielfach keine vollständige "Trockenlegung" erfolgen, so dass ein Großteil der positiven (Neben-) Effekte der Trockenbearbeitung nicht wirksam wird.

Verbunden mit dem vorstehend skizzierten "Flexibilitätsverlust" existieren bei vielen Praktikern darüber hinaus nur teilweise objektivierbare Vorbehalte gegen eine Technologieumstellung. Diese speisen sich u. a. auch aus kolportierten, einzelnen Negativerfahrungen aus frühen Praxistests.

11.2 Ziele des Teilprojektes

Die Minimalmengenschmierung eröffnet nach dem Stand der derzeit verfügbaren Kenntnisse äußerst interessante win-win-win-Situationen mit Blick auf die verschiedenen Nachhaltigkeitsdimensionen. Aus diesem Grund erschienen sie als ein besonders geeignetes und viel versprechendes Versuchsfeld für nachhaltige Prozessinnovationen im Metallverarbeitenden Gewerbe.

Vor dem Hintergrund der Gesamtprojektausrichtung standen dabei insbesondere die folgenden Fragen im Zentrum:

- Welche Faktoren befördern bzw. hemmen die breite Umsetzung einer derartigen produktionstechnischen Innovation im regionalen Branchengeflecht?
- In welchen Bereichen und auf welchen Ebenen lassen sich sinnvolle Verknüpfungen herstellen zwischen den technischen Detailfragen von Prozessinnovationen und den eher übergeordneten Themen einer regionalen Nachhaltigkeitsdiskussion?
- Eignen sich derartige Prozessinnovationen als „Türöffner-Aktivität“ für stärker in die Kernbereiche der betrieblichen Strukturen hineinreichende Nachhaltigkeitsdiskurse?

Die Frage des Einsatzes von Trockenbearbeitung bzw. Minimalmengenschmierung wurde dabei als Diffusion einer verfügbaren technologischen Lösung in ein breiteres Anwendungsfeld verstanden, insbesondere in Bezug auf spanende Bearbeitungsprozesse in KMU. Wobei dieser Diffusionsprozess aus Sicht der einzelnen KMU durchaus einem Innovationsprozess gleich kam.

Darüber hinaus wurde auch auf eine mögliche Erweiterung des "Technologiefensters" gezielt in Richtung auf die trockene Zerspanung von bisher als besonders problematisch erachteten hochlegierten Stählen bzw. auf besonders schwierige Bearbeitungsprozesse, wie z. B. das Formschleifen.

¹⁸³ Die Standzeiten der neuen Werkzeuge, sind allerdings häufig höher, so dass der negative Kosteneffekt in der Massenfertigung wieder ausgeglichen werden kann.

11.3 Zum Vorgehen

11.3.1 Erstversuch und direkte Kooperationsanbahnung

Bei einem der beteiligten mittelständischen Maschinenbauunternehmen (F. Bauermeister) wurde bereits in einer sehr frühen Projektphase die Trockenlegung von zwei Fräszentren als ein möglicher konkreter Ansatzpunkt für nachhaltigkeitsorientierte innerbetriebliche Maßnahmen identifiziert.

Eine von Projektmitarbeitern durchgeführte Bestandsaufnahme zeigte das folgende Bild: Das Unternehmen stellt Spezialmaschinen (Mühlen) für die Lebensmittelverarbeitung her. Diese Aggregate werden überwiegend aus fremdbezogenen Teilen montiert. Dennoch werden für gelegentlich notwendige Anpassungen und die Endfertigung eine Reihe von spanend arbeitenden Werkzeugmaschinen, insbesondere Drehmaschinen, vorgehalten. Auf zwei CNC gesteuerten Fräszentren werden darüber hinaus periodisch in kleinen Serien (ca. 1.000 – 3.000 St/Los) Reibwalzen endbearbeitet.

Das Unternehmen hatte schon recht weit gehende Erfahrungen mit Trockenbearbeitung. Ca. 50% des Produktspektrums wurden aufgrund externer Fertigungsvorgaben eines Werkzeugherstellers bereits trocken bearbeitet. Von den beiden erwähnten Fertigungszentren erzeugen stammte der überwiegende Teil der betrieblich anfallenden Bearbeitungsspäne (> 90%), wobei allerdings eine Getrennthaltung der KSS-freien und der KSS-haltigen Späne aus Gründen des Lagerplatzes und des Organisationsaufwandes (für zwei getrennte Erfassungslogistiken) unterblieb. Von einer weiter gehenden „Trockenlegung“ der Maschinen versprach sich der Betriebsleiter insbesondere eine erleichterte Lagerung und Entsorgung dieser Späne. Von den vier noch mit KSS zu bearbeitenden Werkstücken waren zwei aus nichtrostendem Stahl, die anderen beiden vergütet, einmal Baustahl, einmal Werkzeugstahl.

Als wesentliches Hindernis für eine selbsttätige Veränderung der bisherigen „gemischten Produktion“ benannte der Betriebsleiter die folgenden Gründe:

- Es ist problematisch, die Fertigungszentren für die Umstellungsphase bis zur Erreichung eines betriebssicheren und zeit-optimierten Schneidvorganges¹⁸⁴ aus der laufenden Fertigung zu nehmen
- Mangelnde Personalressourcen für die Initiierung, die Betreuung sowie die Vor- und Nachbereitung entsprechender Spanversuche
- Mangelnde innerbetriebliche Kompetenz für einen sehr gezielten Suchlauf nach geeigneten Werkzeugen (und Hilfseinrichtungen bei Minimalmengenkonzeption).

Zur Unterstützung des Betriebes wurde durch die Projektmitarbeiter Kontakt mit einem regional ansässigen Werkzeughersteller (der Fa. Fette) aufgenommen, der schon einen Teil der bereits eingesetzten Trockenbearbeitungswerkzeuge lieferte. Von diesem Werkzeugmaschinenhersteller wurde grundsätzliches Interesse und die Bereitschaft zur aktiven Unterstützung des Umstellungsvorhabens signalisiert. Die notwendigen direkten Kontakte auf der Arbeitsebene beider Häuser wurden hergestellt und die Anforderungsprofile der Produktionen ausgetauscht.

Trotz wiederholtem Nachhaken kam die anberaumte Kooperation allerdings nicht zustande. Es zeigte sich, dass bereits die für die Vorbereitung fundierter Zerspanversuche notwendigen vielfältigen Feinabstimmungen die verfügbaren zeitlichen Ressourcen der auf der Arbeitsebene involvierten Beschäftigten überstiegen. Offenbar waren derartige, nicht auf die unmittelbare Abwicklung des Kerngeschäftes gerichtete, Aktivitäten weder in der Personaldecke der produzierenden Unternehmen noch beim Zulieferer abgedeckt. Die Diskussion ergab, dass in beiden Häusern aufgrund schwieriger wirtschaftlicher Lage des

¹⁸⁴ Aufgrund der nur periodisch anfallenden Fertigungsaufträge wären dagegen Versuche von 1-2 Tagen Dauer auch in der Regelfertigung einplanbar.

Maschinenbaus in den letzten Jahren massiv Personal abgebaut worden war.

11.3.2 Einbindung von Technologie-Promotoren

Da die Projektmitarbeiter aus langjähriger KMU-Beratung die Erfahrung hatten, dass in den Betrieben nur dann Akzeptanz für Prozessveränderungen zu erreichen ist, wenn in endlicher Zeit erkennbare Erfolge eintreten, wurde für einen weiteren Ansatz zur Thematik der Trockenbearbeitung gezielt ein anderer Lösungsweg gesucht.

Es zeigte sich, dass sich in der Region zu diesem Zeitpunkt gerade eine besonders günstige Gelegenheit¹⁸⁵ eröffnete. Auf der einen Seite war durch Herrn Prof. Dräger vom Fachbereich Maschinenbau und Produktion an der Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW) in Hamburg im Januar 2000 auf der regionalen Technologie-Messe NORTEC ein Fachsymposium zum Thema Minimalmengenschmierung/Trockenbearbeitung organisiert worden¹⁸⁶ auf dem eine Reihe von Vorreiterunternehmen und Lösungsanbietern vor einer breiten Zuhörerschaft aus regionalansässigen Firmenvertretern über Möglichkeiten und Grenzen dieser Technologielinie berichteten. Auf der anderen Seite wurde vom VDMA-Nord als einschlägigem regionalem Fachverband nicht nur diese Veranstaltung unterstützt, sondern auch eine Mitgliederbefragung zur KSS-Problematik durchgeführt.

Diese beiden Aktivitäten machten es möglich, innerhalb kürzester Zeit drei interessierte Produktionsunternehmen zu finden, und in Zusammenarbeit mit dem Labor für Fertigungstechnik von Herr Prof. Dräger ein passgenaues Unterstützungsprojekt zu entwerfen.

Das Unterstützungskonzept zielte direkt auf die Entschärfung derjenigen, die sich auch in dem eingangs skizzierten Praxisfall als wesentliche Hemmnisse für eine Prozessumstellung erwiesen hatten. Die für eine erfolgreiche Umstellung unter Produktionsbedingungen notwendigen Schneidversuche wurden aus den Betrieben auf die Maschinen des Fertigungslabors „ausgelagert“. Die Mitarbeiter des Fertigungslabors übernahmen neben der Versuchsdurchführung insbesondere auch die Rolle von Vorhaben-Managern. Sie konzipierten ein technisches Lösungskonzept, sondierten in der Zulieferindustrie Kooperationsmöglichkeiten und vereinbarten diese. Schließlich koppelten sie in eigenständiger Verantwortung die Ergebnisse der Zerspanversuche immer wieder mit den Produktionspraktikern aus den beteiligten Unternehmen zurück. Das Teilprojekt ähnelte insofern durchaus dem Aufbau des „Technologienetzes – Trockenbearbeitung“, welches zeitgleich als eine vom BMBF unterstützte Aktivität von vier Technologiezentren in Süd- und West-Deutschland durchgeführt wurde¹⁸⁷. Mitarbeiter des nächstgelegenen Zentrums am Institut für spanenden Fertigung (ISF) in Dortmund waren vor diesem Hintergrund auch mehrfach Teilnehmer an fachöffentlichen Aktivitäten in der Hamburger Region.

11.4 Minimalmengenkühlschmierung in der Praxis¹⁸⁸

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse aus den ersten Untersuchungen beim Drehen unter besonderer Berücksichtigung der Diplomarbeit da Costa Ribeiros¹⁸⁹ zusammengefasst. Abbildungen und Tabellen wurden aus dieser Arbeit übernommen, z. T. wurden sie überarbeitet bzw. verändert.

¹⁸⁵ Man könnte hier von einem lokalen „window of opportunity“ sprechen

¹⁸⁶ Das Workshopthema lautete „Trockene Späne – saubere und gesunde Arbeitsplätze – Minimalmengenschmierung bewährt sich in der Praxis“. Zum Workshop wurde auch ein entsprechender Reader veröffentlicht (VDMA-Nord 2000).

¹⁸⁷ Dieses Technologienetzwerk wurde auch nach dem Auslaufen der BMBF Finanzierung fortgeführt. Nähere Informationen unter www.trockenbearbeitung.de (Herbst 2003)

¹⁸⁸ Bericht von Prof. Dräger Labor für Fertigungstechnik an der HAW

¹⁸⁹ P. J. da Costa Ribeiro 2002

11.4.1 Ausgangslage

Die Einführung der Minimalmengenkühlschmierung in die Fertigung mittelständischer Unternehmen scheitert meist an den Rahmenbedingungen, wie z. B. der Terminalsituation. Mit den Untersuchungen, über die hier berichtet wird und insbesondere mit der oben genannten Diplomarbeit, sollte im Labor geklärt werden, ob die Einführung der MMKS- Technologie für eine gegebene Maschine mit einem ebenfalls festliegenden Teilespektrum technisch machbar und wirtschaftlich sinnvoll ist. Damit wären die Voraussetzungen geschaffen, eine Umstellung in Angriff zu nehmen.

Das Teilespektrum für die erste Versuchsreihe kam von der Herose GmbH, die Untersuchungen wurden im Labor für Produktionstechnik durchgeführt. Bearbeitet wurde ein für das Teilespektrum der Herose GmbH repräsentatives Drehteil aus X5CrNi18-10 (1.4301) gemäß Abbildung 62.

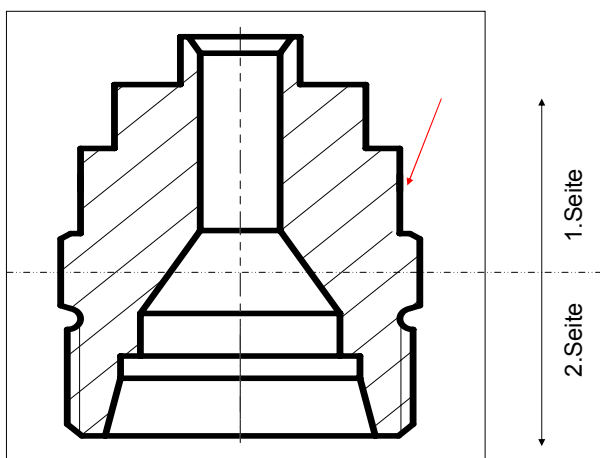


Abbildung 62_Werkstück, Ausgangsmaterial SW 27, Markierung: Änderung gegenüber Serienteil

11.4.2 Ausrüstung und Einstellungen

Maschinen

Herose GmbH: Gildemeister Doppelspindler mit Trommelrevolver, Aufnahme Zylinderschaft 30

Labor: EMCOTURN 365 als Einspindler mit Sternrevolver, Aufnahme Zylinderschaft 30

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Maschinen besteht in der Anordnung der Werkzeuge im Revolver, die zu unterschiedlichen Hebelarmen (140 gegenüber 220 mm) führt und u. U. die Aufnahme der Prozesskräfte beeinflusst. Die Rückseitenbearbeitung wurde im Labor durch Umspannen ersetzt. In allen anderen Daten sind die Maschinen unmittelbar vergleichbar.

Werkzeuge

Die Werkzeuge sind in Tabelle 33 zusammengefasst. Sie wurden nach Beratung durch die Hersteller in Anlehnung an die zur Nassbearbeitung verwendeten Werkzeuge ausgewählt und an die Aufnahme im Revolver der EMCO angepasst.

Tabelle 33_ Werkzeuge für die Bearbeitung

Platz-Nr	Hersteller	Bezeichnung-Zerspanwerkzeug	Aufgabe
Seite 1			
T1	Sandvik	CNMG 120408 -QM 2025	Schruppen
T10	Baublies	IRG -K –Sp.Drm.5-15mm 60°	Kegelrollierwerkzeug
T2	Gühring	6.00 K10/20 Guehring63113	Anbohren
T3	Gühring	R-RT1 F 02478 6.000 K/P33890	Bohren 6.00 mm
T4	Dieterle	WBGT – 060104 R G1A –C60	Kegel 30° -Innen
T6	Sandvik	VBMT 160404 UM 1025	Schlichten & Freistechen
T8	Sandvik	N151.2 -300 -4E 1025	Abstechen
Seite 2			
T1	Sandvik	CNMG 120408 -QM 2025	Schruppen
T2	Sandvik	R415.5 –1400 -30 AC1 1020	Bohren 14.00 mm
T3	Dieterle	WBGT – 060104 R G1A –C60	Kegel 60° -Innen
T4	Sandvik	CCMT 060204 -UF 1025	Kontur Innen
T6	Sandvik	VBMT 160404 UM 1025	Schlichten & Freistechen
T7	Sandvik	R166.0G –16MM01 -150 1020	Gewinde M26X1.5

Das Kegelrollierwerkzeug ist eine Sonderanfertigung mit innerer Zuführung. Die Bohrstangen für die Innenbearbeitung wurden gekürzt auf 3 bis 4 x d, um die Vibrationsgefahr zu verringern. Bei der Bearbeitung der zweiten Seite mit der Bohrstange übersteigt die Auskraglänge die zulässige Maximallänge, diese Bearbeitung konnte noch nicht getestet werden.

Platten und Beschichtungen

- Sandvik
GC2025 (DIN ISO 513: M25); TiC,Al₂O₃,TiN
GC 1020 (DIN ISO 513: P20);TiN
GC 1025 (DIN ISO 513: P30); TiAlN
- Gühring
FIRE – Schicht
TiAlN-TiN-Basis
(Farbe rot-violett)
- Dieterle
G5D-BD4; TiN

Ausrüstung zur Minimalmengen Kühlschmierung

Aggregat

SINIS LubriLin Vario, Öl Lubrioil von SINIS.

Die Ansteuerung des Aggregates erfolgte über die Steuerung, vergleichbar den Befehlen Kühlmittel ein/aus. Die Einstellung und Abstimmung von Luftdruck und Ölmenge wurde

durch Versuche optimiert. Sie musste, in Abhängigkeit von der Lage (innen/außen), dem Querschnitt der Zuführung sowie vom Werkzeug selbst, von Hand erfolgen, was für die Serienbearbeitung nicht vertretbar ist. Die Zuführung vom Aggregat zum Revolver wurde so verlegt, dass ein einfaches Umschalten (Kugelhahn) möglich war.

Zuführungen

Nur sehr wenige Werkzeugmaschinen haben mittlerweile für die Aerosole der Minimalmengen- Versorgungseinheiten geeignete Zuführungen. Im vorliegenden Fall waren die Zuführungen durch den Revolver, über die Schnittstelle Revolver/Werkzeughalter und durch das Werkzeug trotz scharfer Umlenkungen und plötzlicher Querschnittveränderungen akzeptabel. Nachdem die Undichtigkeiten an Verschraubungen, Spannzangen usw. behoben waren und die Anlage sehr sorgfältig gereinigt war (je Kanal 10 min ausblasen!), klappte die Zuführung befriedigend. Die Mengenmessungen ergaben unklare Ergebnisse, letztlich half die „Fingernagelprobe“ (genug Schmiermittel) und das Kriterium „kein Nebel“(zuviel Schmiermittel).

Als äußere Zuführung vom Werkzeughalter zur Wirkstelle wurde Rohrmaterial 6 x 2 bzw. 5 x 1.5 mm aus Kupfer verwendet. Negativ war die labile Schnittstelle Rohr/Werkzeughalter durch schwenkbare Kunststoffclips mit Innengewinde M6 bzw. M5, weil durch wegfliegende Späne die Anstellwinkel verändert wurden. Die Anstellwinkel der Rohre wurden so gewählt, dass das Medium „unter“ den ablaufenden Span gesprüht werden konnte.

Bei der inneren Zufuhr durch die Bohrer mussten zuerst die Spannzangen gedichtet werden, was letztlich durch ein Kunststoffrohr erreicht wurde. Die Rückseite des Bohrerschaftes war nicht MMKS-gerecht ausgeführt, vgl. Abbildung 64. Die innere Zufuhr durch das Rollierwerkzeug funktionierte ohne Probleme.

11.4.3 Erfahrungen aus der Bearbeitung

Ausgehend von den Schnittdaten bei der Nassbearbeitung wurden die Prozesse zuerst nach dem Kriterium Spanform optimiert und dabei der Verschleiß beobachtet. Angestrebt wurden kurze Wendespäne und die Vermeidung von Aufbauschneiden. Insgesamt wurde beobachtet, dass nicht der Freiflächenverschleiß das Standzeitkriterium ist, sondern der Adhäsionsverschleiß, mit der Folge von Aufbauschneidenbildung, Verkleben und Verschweißen. Diese Verschleißform zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren, gelang i. d. Regel durch eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeiten (10 bis 20 %) bei gleich bleibendem oder leicht reduziertem Vorschub.

Die werkstückbezogenen Standzeiten unter MMKS entsprachen den Ergebnissen aus der Nassbearbeitung oder übertrafen diese. Dies wurde vermutlich erreicht durch die sorgfältige Einstellung der Zuführung an die Wirkstelle und die damit verbundene Reduzierung der Reibung.

Schruppbearbeitung

Bei der Schruppbearbeitung mit der Wendeschneidplatte von Sandvik konnte eine Standzeit von 27 Werkstücken erreicht werden. Die Plattengeometrie ist ein Kompromiss. Der Eckenwinkel von 80° ist für die MMKS- Bearbeitung ungünstig, weil der Span nicht leicht genug abläuft. Besser wäre hier vermutlich ein Eckenwinkel von 55° (Abbildung 63). Außerdem führt die Ausführung der Spanleitstufe zu Aufschweißungen.

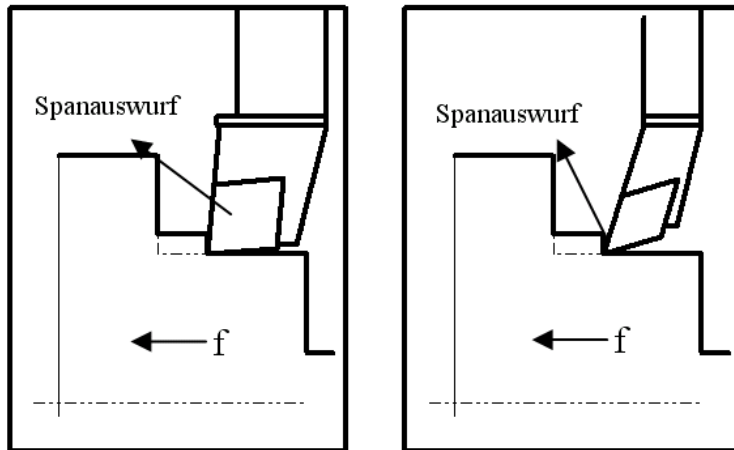


Abbildung 63_Schruppwerkzeug $\epsilon = 80^\circ$ und $\epsilon = 55^\circ$

Schlichtbearbeitung

Bei der Schlichtbearbeitung mit der Wendeschneidplatte von Sandvik wirkte sich der große positive Spanwinkel begünstigend aus. Durch die geringe Spanabnahme war gewährleistet, dass das MMKS-Medium an die Wirkstelle gelangt. Im Vergleich zur Nassbearbeitung veränderte sich die Werkzeugverschleißart von einem Freiflächenverschleiß zu einem adhäsiven Verschleiß. Insgesamt war die Standzeit deutlich höher als bei KSS- Bearbeitung

Bohren

Außer dem typischen Freiflächenverschleiß, vergleichbar der Nassbearbeitung, waren unter Minimalmengenkühschmierung zusätzlich ein Schneidkantenausbruch und Ausbruch an der Hauptschneide zu beobachten. Das MMKS-Medium konnte durch die Lage der Austrittskanäle nicht an die Wirkstelle gelangen. Von Vorteil wären daher jeweils ein Schmiermittelaustritt an jeder Spannute und offenere Spannuten. Außerdem sollte der Ausführung des Bohrerschaftes auf der Rückseite mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden, vgl. Abbildung 64.

Innenkegel

Die sehr kleine Platte erfordert eine besonders genaue Einstellung der MMKS- Zuführung, mit der dann befriedigende Ergebnisse erreicht wurden. Der Verschleiß war dem bei der Nassbearbeitung vergleichbar. Allerdings wird hier deutlich, dass bei länger auskragenden Bohrstangen, die für tiefer im Werkstück liegende Bearbeitungen erforderlich sind, eine Zuführung durch den Schaft die einzige Möglichkeit sein wird, das Medium an die Wirkstelle zu transportieren.

Abstechen

Die Zuführung von oben konnte wegen der Werkzeuggeometrie und wegen der Störung der Einstellung durch die Späne und die Plattenform nicht befriedigend gelöst werden. Die Schmierung erfolgte daraufhin „von unten“, d. h. der Strahl wurde auf die Freifläche gerichtet. Damit wurden mit der Nassbearbeitung vergleichbare Standmengen erzielt. Besser wäre ein Schmierung von oben z. B. mit $-5E$ Platten.

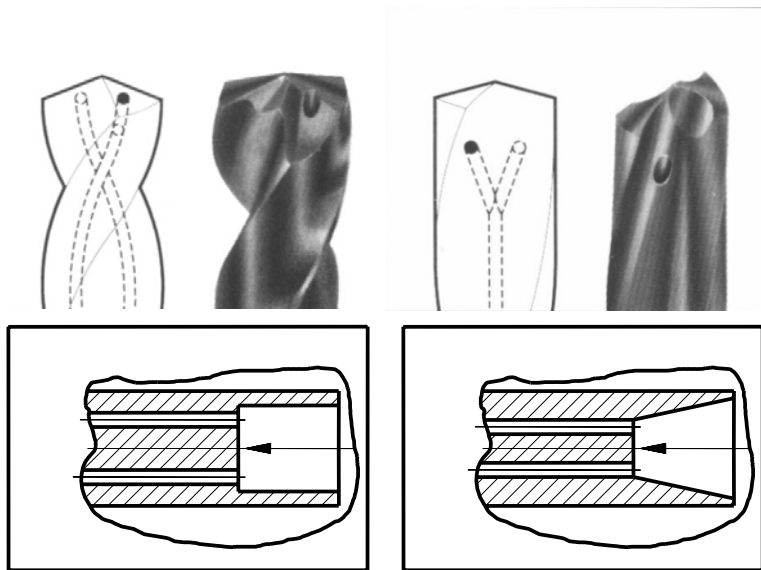


Abbildung 64_ Ausführung des Bohrers, oben Schneiden und Spannuten, unten Schaft. Links ungünstig, rechts richtig

NC-Anbohren

Aufgrund von größeren Schneidkantenausbrüchen am unbeschichteten VHM NC-Anbohrer wäre zu empfehlen, einen FIRE-beschichteten NC-Anbohrer der Firma Gühring zu verwenden.

Schnittdaten

Ausgehend von den Auswertungen haben sich die Schnittdaten nach Tabelle 34 ergeben.

Tabelle 34_ Schnittdaten für die Minimalmengen Kühlschmierung, 1. Seite

Bearbeitungsart	Hersteller	s in 1/min	f in mm	a _p in mm
Schruppen, plan außen längs	Sandvik	2500	0,25	0,5
		3300	0,2	2,5
Schlichten Freistich	Sandvik	2200	0,1	plan 0,05, längs 0,2 1,5
Rollieren	Baublies	700	0.1	Zustellung
			0.05	z = - 2,0 mm z = -6,1 mm Verweilzeit = 1 sec
Anbohren	Gühring	2000	0.1	-
Bohren	Gühring	1800	0,07	-
Innenbearbeitung	Dieterle	2000	Schruppen 0,08	0,5
			Schlichten 0,03	0,1
Abstechen	Sandvik	max. 1700	bis x = 7 > 0,09	-
			bis x = -1 > 0,03	-

Der Arbeitsplan wurde gegenüber dem Vorgehen bei der Herose GmbH nicht verändert, z. B. wurde beim Schlichten der Kontur mit $n = \text{const.}$ gefahren. Insgesamt zeigt sich, dass bei MMKS-Bearbeitung ein größeres Spanvolumen/Zeiteinheit erreicht wurde. Dabei wurde allerdings der Umkehrschluss, nämlich die Nassbearbeitung mit den optimierten Werkzeugen und Schnittdaten nicht verfolgt.

Werkstückqualität

Um eine Aussage über die Prozesssicherheit zu bekommen, wurden Maßhaltigkeit und Oberflächengüte betrachtet. Für die erste Seite wurden die in Tabelle 35 zusammengefassten Merkmale untersucht.

Tabelle 35 Merkmale zur Beurteilung der Werkstückqualität

Lfd. Nr.	Merkmal	Toleranz, Forderung	Verwendete Geräte
1	Durchmesser 18.9 mm	- 0.1 mm	Dreikoordinatenmessmaschine
2	Länge 4.5 mm	± 0.1 mm	Dreikoordinatenmessmaschine
3	Koaxialität Kegel 30°	0.02 mm	Dreikoordinatenmessmaschine
4	Oberflächengüte am Durchmesser 18.9 mm	$R_a < 3.2 \mu\text{m}$	Tastschnittgerät
5	Oberflächengüte des Rollierergebnisses	$R_a < 0.1 \mu\text{m}$	Tastschnittgerät

Für die Beurteilung der Maß-, Form- und Lagegenauigkeit wurden die Kennwerte zur Beurteilung der Qualität (c_p) und der Prozessbeherrschung (c_{pk}) herangezogen. Bei der Bearbeitung mit MMKS waren die Kennwerte für die Merkmale 1 und 2 deutlich größer 1, aber kleiner als bei Nassbearbeitung. Das bedeutet, die Anforderungen waren erfüllt, die Schwankungen sind aber bei MMKS-Bearbeitung größer. Insbesondere ergaben sich periodische Schwankungen des Prüfdurchmessers, die sich vermutlich durch die Bildung bzw. den Abtrag von Aufbauschneiden erklären. Bei Merkmal 3 (Innenbearbeitung des Kegels) zeigte sich - sowohl bei Nass- als auch bei MMKS-Bearbeitung - daß der Prozess bei der spanenden Bearbeitung mit der sehr schlanken Bohrstange nicht ohne weiteres beherrschbar ist. Hier müsste zusätzlicher Aufwand in die Optimierung der Technologie gesteckt werden.

Die Oberflächengüte bei Merkmal 4 wurde durch die MMKS-Bearbeitung deutlich verbessert, die R_z - und die R_a -Werte wurden ungefähr halbiert. Der Vergleich der Oberflächenprofile zeigt, dass bei MMKS-Bearbeitung weniger Störungen im Prozess auftreten, was sich mit der guten Schmierung erklären lässt.

Für die Rollierbearbeitung stand ein Sonderwerkzeug mit innerer Zuführung zur Verfügung. Es wurde, abweichend von dem Vorgehen bei der Herose GmbH, zuerst versucht, mit Kühlschmierstoff zu rollieren. Anschließend wurde, entsprechend dem Arbeitsplan der Herose GmbH, mit einem Spray geschmiert und mit MMKS-Medium gearbeitet. Durch den Übergang vom KSS-Rollieren zum MMKS-Rollieren wurden die Rauigkeitskenngrößen halbiert. Dieses erklärt sich aus der Verschmutzung des Kühlschmiermittels. Die Schmierung mit Spray ergibt ungefähr gleiche Werte wie bei MMKS, allerdings muss beim Spray der Prozess jeweils zum Schmieren unterbrochen werden.

11.4.4 Zusammenfassung und Ausblick

Obgleich nicht alle Teilschritte überprüft wurden, kann gesagt werden, daß die Bearbeitung des für das Teilespektrum des Industriepartners repräsentativen Werkstücks mit MMKS erfolgreich möglich ist. Die ermittelten Schnittdaten lassen vermuten, daß eine Reduzierung

der Hauptzeit zu erreichen ist. Beim Rollieren können zusätzlich Nebenzeiten eingespart werden, weil das sehr reine MMKS-Medium durch das Werkzeug geführt werden kann und damit keine Prozessunterbrechung zum Schmieren erforderlich ist.

Vor einer Umstellung im Betrieb müssen die oben angesprochenen Änderungen der Schrappwerkzeuge und der Bohrer angegangen werden, außerdem sind die Schnittdaten für das Innenbearbeiten und das dazu gehörige Werkzeug hinsichtlich der Zuführung zu optimieren. Es empfiehlt sich, diese letzten Anpassungen an der Maschine der Herose GmbH vorzunehmen, da in der Feinabstimmung die Unterschiede in der Bauform, insbesondere in der Werkzeugaufnahme der Maschine zu berücksichtigen sind. Der Zuführung des Mediums vom Werkzeughalter an die Wirkstelle ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen, zu fordern sind stabile Düsen bei äußerer Zufuhr und möglichst glatte Zuleitungen bei innerer Zufuhr.

Voraussetzung für den Serien-Einsatz ist eine Versorgungseinheit, an der die Einstellungen für die einzelnen Werkzeuge hinterlegt werden können und über das CNC-Programm abrufbar sind. Der Projektpartner SINIS schlägt hierfür das sogenannte Digitalgerät vor. Die Adaption eines solchen Gerätes sollte ebenfalls gleich bei der Herose GmbH vorgenommen werden.

Betrachtet man die Kosten bzw. Zeiten für die Umstellung, so ergibt sich folgendes Bild:

Digital- Gerät Fa. SINIS

Beschaffungskosten ohne Adaption an die Steuerung rd. 6 000.- €

Umbauzeit, die Maschinenstillstand erforderlich macht1 Tag

Zeit, ohne Maschinenstillstand 1 Tag

Zusätzliche Werkzeuge und Halter, geschätzt 1 250.- €

Spezielle Zuführungen, Abdichtungen usw. rd. 500.- €

Dem gegenüber stehen die Einsparungen beim Kühlschmiermittel, die Reduzierung des Waschaufwandes, u. U. das größere Spanvolumen/Zeiteinheit und nicht zuletzt die besseren Arbeitsbedingungen

11.4.5 Gemischte „Vor-Ort“ Erfolge

Parallel zu den „labor-technischen“ Untersuchungen wurden von den Projektmitarbeitern bei den verantwortlichen Beschäftigten aus den beiden beteiligten Produktionsunternehmen die Triebkräfte und die Hindernisse einer Prozessumstellung zu erfassen versucht. Hierbei zeigten sich weitere interessante Aspekte:

- Der Schritt zur ‚Reinheit‘ im Zerspanungsprozess wurde vom Management eines der beteiligten Häuser durchaus als Eigenwert angesehen. Dieses mittelständige Unternehmen hat sich weltweit mit Apparaturen für Hochdruck- und Kältetechnik einen herausgehobenen Platz auf einem Qualitätsmarkt erworben. Der bei einer Trockenlegung der Zerspanung entfallende Reinigungsaufwand¹⁹⁰ stellen damit nicht nur eine Steigerung der Produktionseffizienz dar, sondern sie erlauben auch die weitere Annäherung an ein in solch einem Produktsegment förderliches „Reinraum-Image“. Trotz dieses hohen internen Stellenwertes einer Prozessumstellung, war es für die gut ausgelastete Produktion dieses Hauses aus Gründen der Kapazitätsengpässe faktisch nicht möglich, selbst kurze Spanversuche an den Produktionsaggregaten durchzuführen.
- Bei einem anderen Unternehmen waren in der Vergangenheit bereits interne Versuche zur Umstellung auf Trockenbearbeitung durchgeführt worden. Hierbei waren

¹⁹⁰ Eine weitest mögliche Reinigung der produzierten Ventilsitze und Verschraubungen ist bei dem bestimmungsgemäßen Einsatz der gefertigten Apparaturen von höchster Sicherheitsrelevanz, entsprechend aufwändig sind diese Prozessschritte ausgelegt.

Fertigungsprobleme aufgetreten, welche zu relevanten Zusatzbelastungen für die beteiligten Beschäftigten geführt hatten. Obgleich die entsprechenden „Fehler“ später identifiziert werden konnten, verhinderten die „Negativ-Erfahrungen“ für einen längeren Zeitraum weitere betriebliche Umstellungsschritte. Einer (externen) „Erfolgsstory“ kam insofern ein besonderer Stellenwert zu.

Die Laborversuche an der HAW führten zu durchweg positiven und in beiden Häusern anerkannten Zerspannergebnissen. Damit waren einerseits die „harten“ Daten für die Übertragung in die betriebliche Produktionspraxis verfügbar, und andererseits lagen klar kommunizierbare „Erfolge“ auf dem Tisch, um die „weiche“ Seite der Hemmnisse positiv zu beeinflussen.

Im Fall des erst genannten Unternehmens erwies sich einerseits der Produktionsengpass als weiterhin relevantes Hemmnis, selbst bei der Einplanung der abschließend notwendigen Übertragungsversuche.¹⁹¹ Andererseits entwertete eine parallel vorbereitete Kaufentscheidung des Unternehmens für ein hochmodernes Zerspanzentrum mit deutlich andersartigen Schnittparametern relevante Teile der Laborerfahrungen. Die Einführung der Minimalmengenschmierung konnte unter diesen Rahmenbedingungen bis zum Berichtsabschluss dieses Vorhabens nicht erfolgen.

Im zweiten dargestellten Unternehmen, entschied man sich für eine sehr kleinschrittige Umsetzung der positiven Laborerfahrungen in die Produktionspraxis, um nicht durch erneute Fehlschläge eine nachhaltige Beschädigung der Umstellungsbereitschaft der Beschäftigten zu erzeugen. Immerhin wurden auf diesem Wege inzwischen vier Bearbeitungszentren trocken gelegt. Hier kann konstatiert werden, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit ein selbsttragender weiterer Umstellungsprozess erreicht werden konnte.

11.5 Ergebnisse

Bezogen auf die Zielsetzungen des Teilprojektes und die übergreifenden Fragestellungen im Kontext des Gesamtvorhabens konnten die folgenden Ergebnisse erzielt werden:

- Die Prozessinnovation Minimalmengenschmierung ist direkt anschlussfähig an aktuelle „nachhaltige“ betriebliche Gesamtstrategien. Sowohl für die Qualitätsstrategie eines hoch spezialisierten Weltmarktakteurs, als auch mit Blick auf die Flexibilitätsanforderungen eines dienstleistungsorientierten Werkstattfertigers von Spezialaggregaten konnten mit den Geschäftsführungen unmittelbar kohärente Zielbeiträge einer erfolgreichen Prozessumstellungen identifiziert werden.
- Allerdings zeigen die Projekterfahrungen auch, dass zwischen diesen betrieblichen Strategiemodellen und ihrer konkreten Umsetzung in dem betreffenden KMU einige zu überbrückende Hindernisse liegen. Diese finden sich insbesondere im Bereich der (zu) knappen personellen Ressourcen. Überspitzt lassen sich hier die Projekterfahrungen dahingehend deuten, dass die „erfolgreiche“ Ausdünnung der Personaldecke (bzw. die damit erreichte mitarbeiterbezogene Effizienzsteigerung) ein Maß erreicht hat, welches die eigenständige Umsetzung von Prozessinnovationen so sehr zu behindern beginnt¹⁹², dass selbst extern unterstützte Ansätze nur noch schwer vorankommen.
- In diesem Fall haben sich die regionalen Diffusionsbemühungen für betriebliche

¹⁹¹ Für die Übertragung der Laborwerte in die Betriebspraxis sind nicht zuletzt aufgrund der verschiedenartigen Werkzeugmaschinen regelmäßig weitere Versuche durchzuführen, bevor in die Regelproduktion gegangen werden kann. Diese Übertragungsversuche sind jedoch um Größenordnungen kürzer als die Grundversuche im Labor,

¹⁹² Zumindest solange diese Innovationen nicht 1:1 produkt- bzw. marktseitig „aktivierbar“ sind.

Prozessinnovationen als direkt anschlussfähig erwiesen an einen übergreifenden regionalen Nachhaltigkeitsdiskurs.

- Die praktizierte Einbindung regional etablierter Technologieberatungsstrukturen erwies sich als ein Glücksfall, auf jeden Fall als eine sehr effektive Zugangsmöglichkeit, um mit den beteiligten produzierenden KMU in eine betriebliche Nachhaltigkeitsdiskussion einzutreten. Vor dem Hintergrund der hochkompetenten fachtechnischen Betreuung durch die Technologie-Promotoren (Institut für Fertigungstechnik, VDMA), wurde den Projektmitarbeitern eine Art „Kompetenzbonus“ für die Diskussion nachhaltigkeitsorientierter Gesamtstrategien zugebilligt. In diesen sehr offenen Fachdiskussionen zeigte sich ein breites Problembewusstsein für die gesamtgesellschaftliche Nachhaltigkeitsproblematik, bzw. hinsichtlich der Nicht-Nachhaltigkeit bestimmter einzelbetrieblicher Entwicklungsperspektiven. Andererseits wurden auch die begrenzten Spielräume einzelner KMU deutlich, nicht zuletzt in Hinblick auf das „Vorhalten“ von variabel einsetzbaren Lösungskompetenzen.
- In den labortechnischen Versuchen konnten neue Referenzerfahrungen für einige relevante Schnittoperationen erreicht werden. Das praxiserprobte Anwendungsfenster der Minimalmengenschmierung konnte insbesondere in den Bereichen der Zerspanung legierter Stähle und in ungünstigen Schnittpositionen z.B. Innendrehen erweitert werden.
- Es hat sich schließlich gezeigt, dass der Nachhaltigkeitsdiskurs durchaus in der Lage ist, auch dem regionalen Technologietransfer neue Impulse zu geben. Durch seinen generell mehrdimensionalen Ansatz transportiert er neben der technischen Eignung und ökonomischen Tragfähigkeit weitere gleichrangige Zielkategorien. Damit fokussiert er unmittelbar auch auf die „weichen“ Innovationsfaktoren, wie z. B. die strategische Ausrichtung der Betriebe oder die Motivations- und Interessenlagen der Belegschaft.

12 Betriebliches Materialflusscontrolling - Fakten und Kennzahlen als Basis für die innerbetriebliche Nachhaltigkeitsdiskussion

12.1 Kontext zum Gesamtvorhaben

Wie eingangs bereits bei der Beschreibung der Situation der kleinen und mittelständischen Metallverarbeitenden Betriebe der Region dargestellt wurde, verfügen diese Betriebe vielfach nur über sehr eingeschränkte Kenntnisse mit Blick auf die innerbetrieblichen Stoffströme und den Verbleib der Materialien. Dies gilt insbesondere für den Bereich der Hilfs- und Betriebsstoffe.

Bei den zu Projektbeginn durchgeführten ersten Bestandsaufnahmen und der Suche nach win-win-Lösungen auf der Basis einfacher Prozessoptimierungen („Tür-Öffner-Aktivitäten“), aber auch bei der Diskussion von weiterführenden Maßnahmen zur überbetrieblichen Stoffstromvernetzung (Schleifschlammrecycling, Strahlmittelverwertung), stellte sich immer wieder heraus, dass dieses „Nicht-Wissen“ über den inner- und überbetrieblichen Verlauf von Stoffströmen eine wesentliche Barriere darstellt bei der weiter gehenden Ausschöpfung etwaiger Effizienzpotentiale.

12.2 Betriebliche Beispiele

Einer der an den Untersuchungen beteiligten mittelständischer Apparatebauer stand vor der Aufgabe, den neuen gesetzlichen Anforderungen folgend eine VOC-Bilanz zu erstellen¹⁹³. Bei diesem durch die Projektmitarbeiter unterstützten Vorhaben, stellten sich deutliche Lücken in den verfügbaren Datenbeständen des Unternehmens heraus. Einige der wichtigsten waren:

- Für die eingesetzten VOC-haltigen Vorprodukte (Farben und Spachtelmassen) lagen zwar Mengenangaben vor, nicht jedoch strukturierte Informationen über die enthaltenen Lösemittelanteile und -zusammensetzungen.
- Für die eingekauften Lösemittel (für Reinigungs- und Verdünnungszwecke) lagen ausschließlich Preis- und keine Mengenangaben vor.
- Bezogen auf den innerbetrieblichen Einsatzort der eingekauften Lösemittel, konkret für die Aufteilung auf die Bereiche manuelle Entfettung, Verdünnung oder Reinigung im Lackierbereich sowie den Einsatz in einer geschlossenen Teilewaschanlage, waren außer groben Abschätzungen für Teile dieser Anwendungen keine Informationen verfügbar.
- In Bezug auf die mit den Abfällen ausgetragenen VOC-Mengen fehlten aktuelle und als praxisnah zu bewertende Informationen über die Lösemittelanteile in den entsorgten Lösemittel-Wassergemischen ebenso wie jegliche Abschätzung über die Austräge mit anderen Abfallfraktionen wie z. B. Putztücher, Farbreste u. ä.

¹⁹³ Falls eine Anlage betrieben wird, die nach Art der Tätigkeit und Mengendurchsatz unter die 31. BImSchV fällt, ist einmal pro Jahr eine Lösemittelbilanz (VOC) aufzustellen, in der die VOC-Mengen für alle Einsätze und Austragspfade quantifiziert dargestellt werden, um auf dieser Basis die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen überprüfbar zu machen. Diese Verpflichtung besteht im Fall der hier betrachteten „bestehenden Anlage“ zwar erst ab dem Jahr 2005, um aber perspektivisch zu prüfen, ob die geforderten Grenzwerte eingehalten werden können, sollte hier eine Vorabprüfung erfolgen.

Derartige Informationslücken sind keineswegs untypisch¹⁹⁴, sondern bei neuen gesetzlichen Anforderungen eher der Regelfall¹⁹⁵. Sie zeigen allerdings sehr deutlich, dass, unabhängig von gesetzlichen Auflagen, der innerbetriebliche Kenntnisstand weder ausreichend ist, die zentralen betrieblichen „Verluststellen“ zu priorisieren, noch eine valide Basis darstellt für die ökonomische oder ökologische Gesamtbeurteilung einer partiellen Prozessverbesserung (z.B. einer teilweisen Lösemittelrückgewinnung im Bereich der Teilewaschanlage).

In einem anderen Betrieb, der an den Diskussionen und Laborversuchen zum Piloteinsatz der Minimalmengenschmierung beteiligt war, stellte sich in diesem Kontext die Frage, wie hoch der bislang durch den KSS-Einkauf und die Entsorgung der verschiedenen KSS-haltigen Abfälle verursachte Aufwand sei. Zur Beantwortung dieser nahe liegenden Frage waren eine Reihe von Recherche-, Abschätzungs- und Umrechnungsschritten notwendig:

Der KSS-Einkauf erfolgt als Konzentrat in 25 l-Kunststoffkanistern. Im Einkaufssystem waren als Kolli-Größe Paletten KSS-Emulsion hinterlegt, mit beschaffter Stückzahl und Gesamtpreisen. Die Zahl der Kanister pro Palette, die Einzelpreise der Kanister sowie Höhe und Art der Verrechnung der Entsorgungsgutschriften für die Gebinde waren nur als Papierdokumente beim Facheinkäufer verfügbar.

Bei den Maschinenmeistern, der Haustechnik sowie dem Umweltbeauftragten mussten Informationen über:

- das Verdünnungsverhältnis der KSS-Ansätze
- die mittlere Standzeit der KSS-Maschinenfüllungen
- die Höhe der Spülwasserverbräuche (die für die Bestimmung der Mengenanteile von hoher Bedeutung sind, insbesondere für die aus Sicht der Entsorgungskosten wichtigen Wasseranteile in den entsorgten Abfällen) sowie
- Fragen nach weiteren ölhaltigen Einträgen in die Abfallsammelbehälter und den Entsorgungsweg für die Abfälle¹⁹⁶

zusammengetragen werden.

Erst nach Durchführung dieser Recherche konnte ein praxisnahes Bild der betrieblichen IST-Situation erstellt und die Auswirkungen der Trockenlegung eines Teils der Fertigungszentren modelliert und bewertet werden.

Neben der Problematik der nicht strukturiert aufbereiteten Daten erwies sich auch in diesem Fall die Notwendigkeit zur Überschreitung der Abteilungsgrenzen als eine ernstzunehmende Barriere bei der kurzfristigen Bestandsaufnahme der IST-Situation. Es handelt sich dabei weniger um „Abteilungssegoismen“ oder gegenläufige Interessen – also ein „Nicht-Wollen“ – sondern vielmehr um schlichte „Systemträgheiten“ und „Sprachprobleme“, verbunden mit fehlender Zeit für die Klärung derartiger Fragen, sowie für die Abstimmung über das gemeinsame Ziel. Die übereinstimmende Einschätzung der beteiligten Betriebspraktiker war: „Es braucht eine Person die sich so richtig darum kümmert, dann läuft es auch...“

¹⁹⁴ Ökopol erstellte in den letzten Jahren bundes- und europaweit deutlich mehr als 100 derartiger VOC-Bilanzen. Vor diesem Hintergrund kann eindeutig konstatiert werden, dass die skizzierte Situation in dem Fall des Praxispartners eher als Regel, denn als Ausnahmefall beschrieben werden kann.

¹⁹⁵ Hier kann z.B. auf die Erfahrungen aus der Einführung der Konzeptpflichten nach § 20 KrWG Mitte der 90er Jahre oder aber auch auf die ganz aktuelle Diskussion um die Umsetzung der neuen europäischen Chemikalienpolitik nach dem REACH-Ansatz verwiesen werden.

¹⁹⁶ In diesem Fall von hoher Wichtigkeit, da in einer Verbrennungsanlage entsorgt wurde und dabei aufgrund der hohen Wasseranteile jeweils Heizwertzuschläge in relevanter Höhe zu entrichten waren, die bei einer gezielteren Getrennthaltung der Abfälle entfallen könnten.

12.3 Bewertung der Situation

In der vorliegenden Sonder-Situation konnten die externen Projektmitarbeiter im Rahmen des Forschungsvorhabens die Rolle eines „Prozess-Promotors“ auf Zeit übernehmen, doch im normalen Betriebsalltag der meisten produzierenden KMU fehlt es genau in diesem Bereich an personellen Ressourcen. Die Schwierigkeiten bei der innerbetrieblichen Erzeugung rationaler Entscheidungsgrundlagen werden damit zu relevanten Innovationshemmnissen, die zumindest bei Optimierungsoptionen, die nicht unmittelbar die Kernaktivitäten der Unternehmen betreffen¹⁹⁷, eine hohe faktische Wirkung entfalten.

Vor dem Hintergrund dieser Analyse entschied das Projektteam, die Frage der verbesserten Informationsunterstützung der betrieblichen Abwägungs- und Entscheidungsvorgänge in einem weiteren Praxisprojekt genauer zu betrachten und nach geeigneten Lösungsstrategien zu suchen.

Die weiterführende Betrachtung der IST-Situation bei kleinen und mittleren Unternehmen im Metallverarbeitenden Gewerbe zeigte Unterschiede auf, die sich an der Art der gefertigten Produkte festmachen lassen. In Unternehmen, die als teilweise hoch spezialisierte Serienfertiger weltweit in Nischenmärkten erfolgreich sind, mit einer meist sehr eingeschränkten Produktpalette mit weitgehend identischen Arbeitsschritten, stellt sich die Situation deutlich anders dar, als bei Werkstattfertigern, die als Flexibilitätsreserve für größere Unternehmen der Region quasi auf „Zuruf“ unterschiedlichste Leistungen erbringen.

Erstere verfügen vielfach über etablierte Routinen, um die (Kosten)-Einflüsse auf ihre Produktionseffizienz zu bestimmen und zu steuern. Allerdings fokussieren sich diese meist auf wenige als „relevant“ identifizierte Größen. Bei den Werkstattfertigern stellt sich die Situation naturgemäß anders dar. Hier ist die Transparenz über die Details des IST-Standes der Produktion meist deutlich geringer.

Mitarbeiterstellen, die sich mit der Suche nach Optimierungsmöglichkeiten befassen, die quer zu den klassischen Bereichsfunktionen liegen, gibt es jedoch bei den beiden skizzierten prototypischen Unternehmenstypen nicht¹⁹⁸. Ausnahmen bilden allenfalls Unternehmen, die sich aufgrund von Abnehmerforderungen einem strikten Qualitätsmanagement unterwerfen (insbesondere KFZ- und Luftfahrt-Zulieferer). Hier verfügt der QS-Beauftragte in einigen Fällen sowohl über ein übergreifendes als auch über ein Detailwissen zu den Prozessabläufen und hat in Einzelfällen auch Zugriff auf entsprechende Prozessdaten.

Neben selten vorfindbaren personellen „Zuständigkeiten“, ist die Problematik der nicht strukturiert verfügbaren Informationen die zweite große Schwierigkeit. Die in Frage stehenden Häuser haben in der Regel:

- Eine heterogene EDV-„Landschaft“ mit Teillösungen für die verschiedenen Aufgabenbereiche wie Einkauf, Produktionsplanung oder Auftragskalkulation
- setzen weder Materialwirtschaftssysteme noch Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme (PPS) ein.

Ungeachtet der skizzierten „Problembereiche“ verfügen die beschriebenen Unternehmen durchaus über ein gesichertes Wissen in Bezug auf ihre „Außenbeziehungen“. Der Wert der eingekauften Vorprodukte und Materialien, die Art und Menge der gefertigten Produkte u. ä. sind schon aus steuer- und unternehmensrechtlichen Gesichtspunkten jederzeit verfügbar.

Problematischer wird es im Bereich der innerbetrieblichen Materialflüsse. Die Aufteilung der

¹⁹⁷ Bei Aktivitäten die von den Geschäftsführungen als zum core-business zugehörig gewertet werden, erfolgt im Regelfall entweder eine entsprechende interne Ressourcenfreistellung oder aber ein Hinzuziehen externer Berater.

¹⁹⁸ Zwar gehört es regelmäßig zur Aufgabe von Mitarbeitern aus der Arbeitsvorbereitung (oder einem ähnlichen Funktionszuschnitt) bei neu einzuführenden Produktionsverfahren verschiedenste Fertigungsalternativen durchzuspielen. Dies geschieht aber meist nur vor der Technikumstellung und nicht periodisch, während der laufenden Produktion.

eingekauften Vormaterialien auf verschiedene Anwendungsprozesse im Unternehmen, die Art der Vermischung mit anderen Stoffströmen, die Vormaterialanteile und die Hilfsstoffmengen, die nicht mit in die Produkte eingehen und als Abfälle entsorgt werden müssen, sind, wie in den skizzierten betrieblichen Beispielen, meist nur bruchstückhaft bekannt.

Die folgende Abbildung zeigt die beschriebenen Schwachstellen in einem schematischen Überblick:

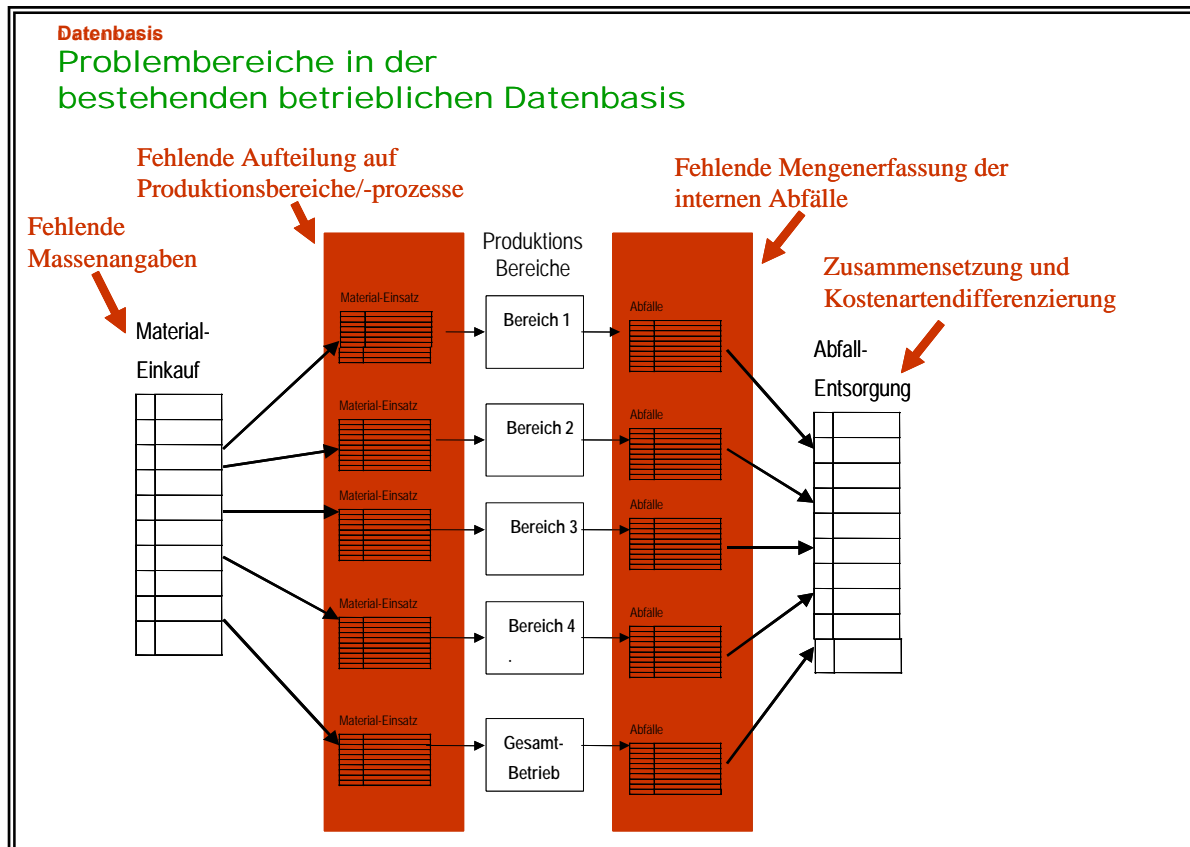


Abbildung 65_ Schematische Darstellung der typischen Schwachstellen in den betrieblichen Daten kleinerer und mittlerer Metallverarbeitender Betriebe

12.4 Konzept-Entwicklung

12.4.1 Bestehende Lösungsansätze

Diskussionen mit Mitarbeitern aus den beteiligten Betrieben zeigten, dass diese insbesondere die Möglichkeiten einer einheitlichen Ablage von Detaildaten über die Zusammenhänge der betrieblichen Materialflüsse vermissen. Fast in jedem Unternehmen existiert aus diesem Grunde eine Vielzahl mehr oder minder umfangreicher „selbstgestrickter“ Aufschreibungen in Form von EXCEL-Listen oder Text-Dateien.

Um die Situation zu verbessern wurde diskutiert, ob die derzeit am Markt verfügbaren EDV-Anwendungen aus dem Bereich der betrieblichen Umwelt-Informationssysteme hier geeignete Lösungen anbieten. Ein Teil dieser Anwendungen setzt auf ein umfassendes EDV-System der Materialwirtschaft oder der Produktionsplanung und -steuerung. Neben der fehlenden EDV-Systembasis in den in Frage stehenden Unternehmen, wurden diese Anwendungen von den Betrieben als vielfach sehr „bürokratisch“ bewertet. Andere Systeme, die aus der Modellierung- und Simulationsunterstützung komplexer Lebensweganalysen entstanden sind, erscheinen aus Sicht der hier in Frage stehenden potentiellen Anwender als zu abstrakt.

12.4.2 Anforderungen

Vor diesem Hintergrund wurde gemeinsam mit einem kleinen Kreis interessierter Betriebspraktiker eine Reihe von Grundanforderungen an eine DV-Unterstützung zusammengetragen. Als wichtige Anforderungen wurden demnach formuliert:

- Freie Wahl und Definition der Controlling-Ebene
=> Auf diese Art und Weise können in einzelnen Betriebsbereichen kleinteilige Controllingstrukturen aufgebaut werden, während gleichzeitig andere Bereiche pauschal zusammengefasst werden.
- Freie Wahl und Definition der betrachteten Materialarten und Produktgruppen
=> so kann eine Beschränkung auf diejenigen Materialflüsse erfolgen, die jeweils als relevant oder interessant erachtet werden. Derartige Festlegungen sollten dabei jederzeit verändert oder erweitert werden können.
- „Überbrückung“ nicht abschließend bekannter Stoffstromzweigungen (und Zusammenführungen) durch Verteilungsschlüssel
=> Auf diese Art und Weise kann das in der Praxis immer wieder auftretende „Nicht-Wissen“ über einzelne Zusammenhänge, zunächst mit Annahmen überbrückt und dann in einem schrittweisen Realitätsabgleich gefüllt und weiter verfeinert werden.
- Möglichkeiten zur freien Bildung von Kennzahlen und routinemäßige Wiederholbarkeit dieser Kennzahlenabfragen
=> Hier sollte die Möglichkeit bestehen, „spielerisch“ verschiedenste Kennzahlen zu bilden und sie auf ihre Eignung und Aussagekraft zu prüfen.

Die folgende Abbildung zeigt diese Anforderungen nochmals im schematischen Überblick.

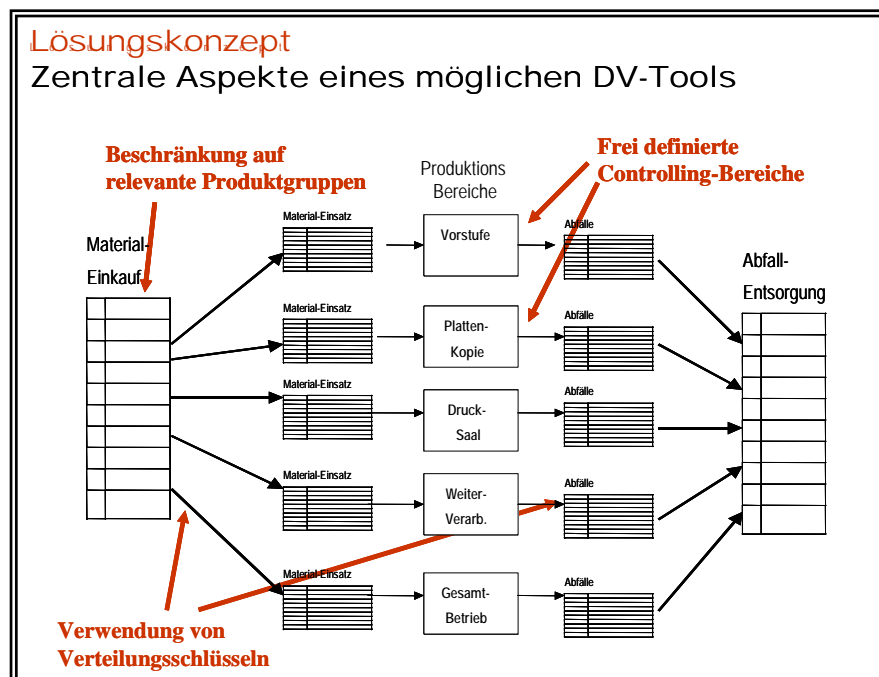


Abbildung 66_ Anforderungen an Systeme zum Materialfluss-Controlling

12.4.3 Prototypisches EDV-Werkzeug

Da die Diskussionen immer wieder zeigten, dass es für die Beteiligten aus den Betrieben vergleichsweise schwierig war, abstrakten Diskussionen zu folgen über Datenstrukturierungen oder informationstechnische Lösungskonzepte, wurden die entwickelten Ansätze zur Realisierung der formulierten Anforderungen im Sinne eines

„Prototypings“ in Form einer einfachen ACCESS-Programmierung umgesetzt.

Der entwickelte Prototyp verfügt über die zentralen Funktionalitäten des erarbeiteten Lösungskonzeptes und zeigt eine mögliche Struktur der Bildschirmmasken. Mit Hilfe dieses „Werkzeuges“ wurden gemeinsam mit den Betriebspraktikern „vor-Ort“ einige der im Projektverlauf identifizierten betrieblichen Prüfaufgaben durchgeführt – u. a. die bereits eingangs angeführte Frage nach der IST-Situation der KSS-Anwendung in einem der beteiligten Häuser.

Im Folgenden werden einige Bildschirmdarstellungen wiedergegeben aus dieser Anwendung bei einem kleinen Werkstattfertiger:

In einem 1. Schritt waren die Controlling-Einheiten für diesen Betrieb zu definieren. In diesem Fall wurden alle Betriebsbereiche aufgegliedert, in denen ölhaltige Abfälle anfallen können.

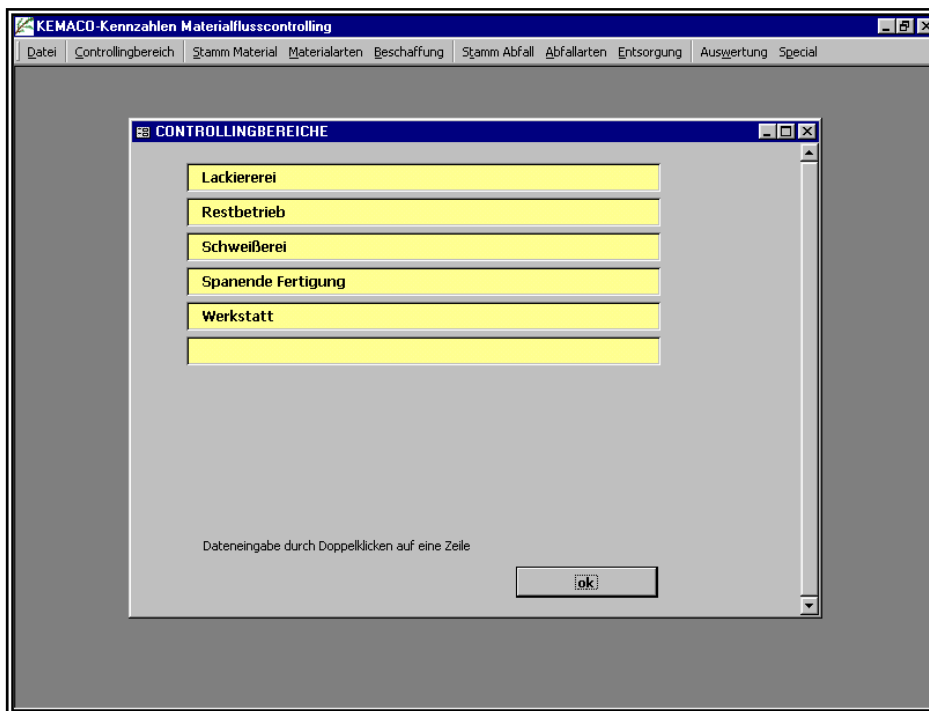


Abbildung 67_ Definition der Controllingbereiche

In einem 2. Schritt erfolgte die Anlage der verschiedenen relevanten Materialgruppen – in diesem Fall derjenigen Materialgruppen, die im Zusammenhang mit den KSS-Strömen stehen, bzw. mit diesen (teilweise) vermischt werden. Neben den KSS-Emulsionen spielten also auch Filtermatten aus den Umlaufsystemen der Fertigungszentren sowie das Ansatzwasser eine Rolle.

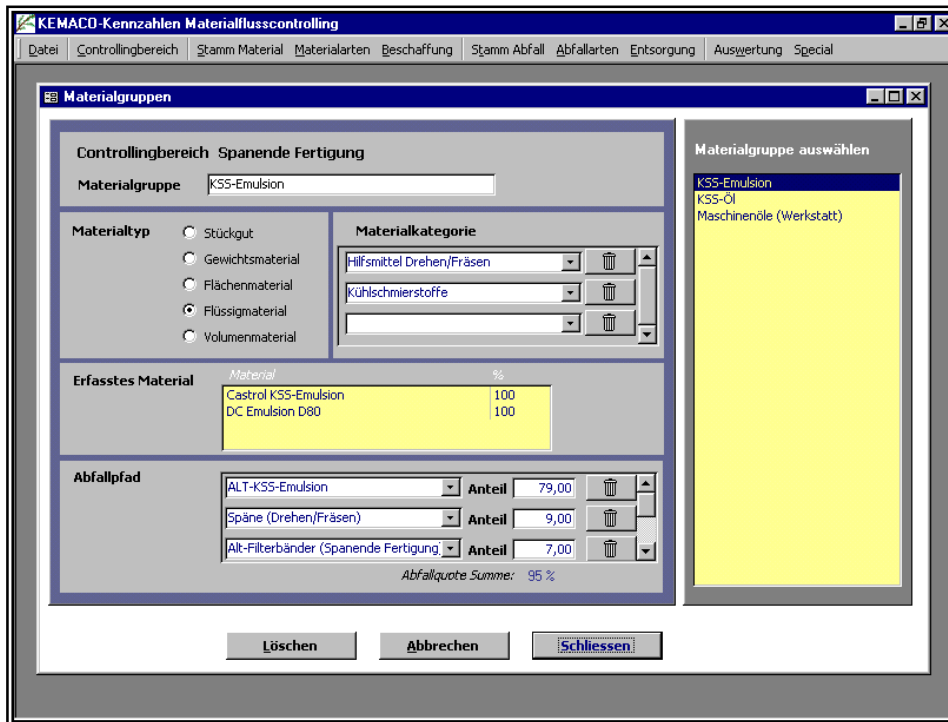


Abbildung 68_ Anlegen und (Text)der Materialgruppen

Um auch die „Neben-Effekte“ des KSS-Einsatzes (z.B. im Bereich der zu lagernden und zu entsorgenden Gebinde) sachgerecht zu erfassen, wurde eine entsprechende Beschaffungsmaske angelegt, die die entsprechenden Querabhängigkeiten zwischen KSS-Menge und Gebindemenge abbildet.

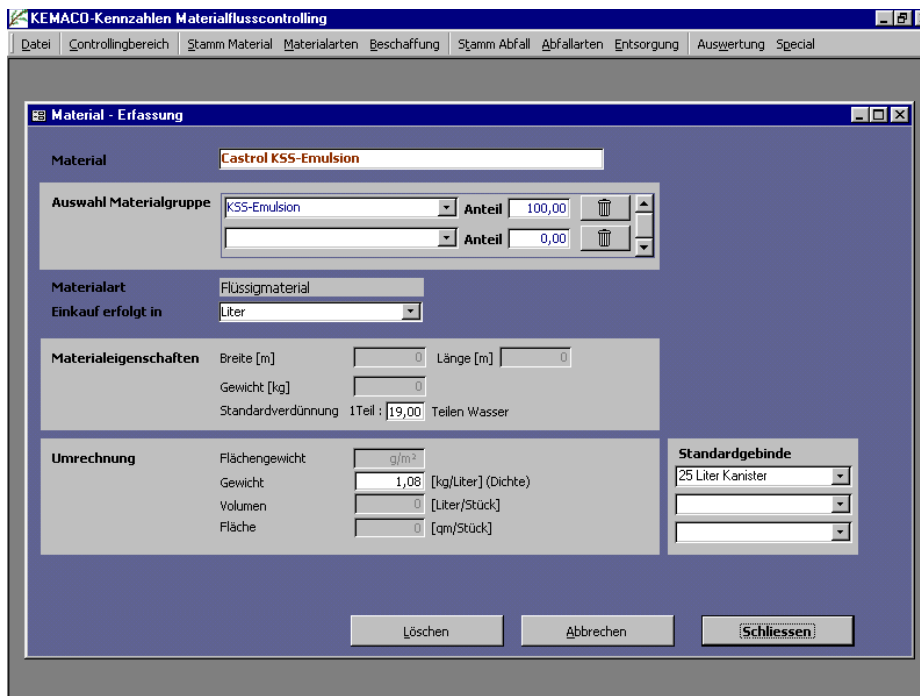


Abbildung 69_ Beschreibung der Erfassung & Lieferung der Materialart

Vor dem Hintergrund des so gesetzten Rahmens können nun die KSS-Mengen beschafft werden. Hierbei wurden Einzelpreise, abweichende Anwendungen und andere Widrigkeiten des Betriebsalltages (Rückgaben, Gebindegutschriften, ...) mit erfasst.

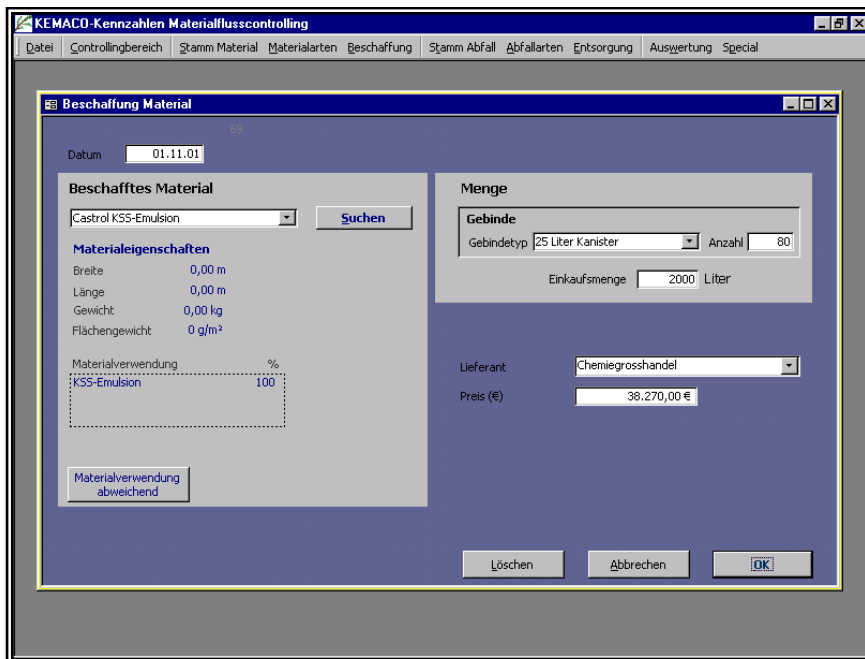


Abbildung 70_Beschaffungsvorgang für KSS-Konzentrate

Auf der nunmehr angelegten Datenbasis können die verschiedensten Routineauswertungen und/oder gezielte Abfragen durchgeführt werden.

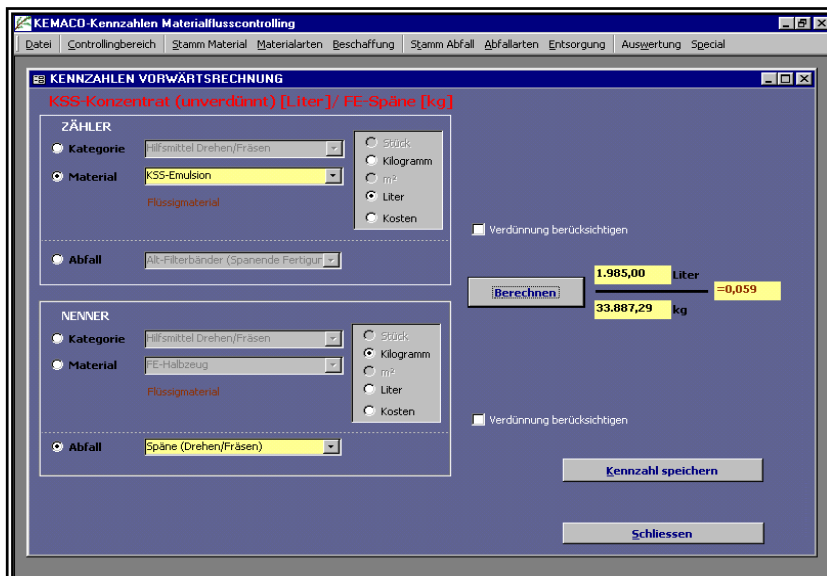


Abbildung 71_Gezielte Kennzahlenabfrage

12.4.4 Anwendungserfahrungen

Bei der gemeinsamen Arbeit mit den Betriebspraktikern zeigte sich, dass die in einem solchen Konzept angelegte Notwendigkeit zur (bereichs-) übergreifenden Planung eine teilweise ungewohnte, aber sehr hilfreiche Anforderung darstellt. Vor der Anwendung des Werkzeuges ist zunächst die Grundstruktur zu erstellen, die insbesondere die Elemente: Controllingeinheiten, Controllinggrößen und dafür notwendige Informationen konkret beschreibt. Zu diesem Zweck ist der Austausch über die realen Abläufe in den verschiedenen Betriebsbereichen notwendig (z.B. über die Art der Informationen, die dem Einkauf zur Verfügung stehen). Das dabei entstehende gemeinsame Verständnis der IST-Situation stellt nicht nur aus externer Sicht bereits ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeit dar.

Für einzelne Mitarbeiter war insbesondere die Möglichkeit, Routineabfragen zu hinterlegen, von besonderem Interesse, z.B. für Pflichtaufgaben im Bereich der Abfallüberwachung, Hierbei wurde die Gestaltung in der betriebseigenen "Sprache" für die Bezeichnung von Anfallstellen, Abfallgemischen etc. als besonders hilfreich erachtet.

Das Hauptinteresse der Geschäftsführung galt dagegen der Möglichkeit zur freien Kennzahlenbildung. Interessant ist hierbei die fast immer bestehende Ambivalenz zwischen Skepsis: „Na ja, bei solchen Vergleichen muss man ja sehr vorsichtig sein, das kommt ja immer ganz darauf an“ und Begeisterung: „Da könnten wir ja endlich mal feststellen wie (diese oder jene) Produktion wirklich läuft!“ und schließlich: „Interessant wäre doch auch der Vergleich mit dem Durchschnitt der Wettbewerber!“

Deutlich wurde bei diesen Diskussionen allerdings auch, dass auch solch ein „schlankes“ Controlling-Konzept auf die ausdrückliche Unterstützung der Geschäftsführung angewiesen ist. Wenn nicht in jedem Einzelfall zunächst wieder eine grundlegende Neustrukturierung des Systems erforderlich sein soll, ist eine Mindestmenge an routinemäßiger Pflege des Systems notwendig. Dabei könnten die Dateneingaben durchaus im Quartalsrhythmus oder sogar nur einmal jährlich erfolgen.

12.5 Ergebnisse und Perspektiven

Prinzipiell lassen sich das im Projektkontext entwickelte EDV-Tool und das dahinter liegende Grundprinzip eines Materialfluss-Controllings, welches in der Tiefe sehr variabel ist, als Kernelemente der materiellen, betrieblichen Nachhaltigkeitssteuerung ausbauen.

Dabei sind verschiedene Entwicklungsperspektiven denkbar:

1. Da das Materialfluss-Controlling bei entsprechender Gestaltung auch die Informationen über die gefassten (gezielten) und diffusen Emissionen aus dem Unternehmen enthält (bzw. diese über Differenzrechnung bestimmen kann) ist es geeignet, als Kernelement der betrieblichen Umweltberichterstattung zu dienen und diesbezüglich weiter ausgebaut zu werden. Auf dieser Basis können sowohl gesetzlich vorgesehene Berichtspflichten, wie z.B. Abfallbilanzen¹⁹⁹ oder Lösemittelbilanzen, erstellt werden, als auch qualifizierte freiwillige Umweltberichte für verschiedenste Adressatenkreise.
2. Die im bisherigen Prototyp eher beiläufig mitgeführten Kosteninformationen können um die Handhabungs-, Lagerungs- und Verwaltungskosten auf den verschiedenen Produktionsstufen ergänzt und damit zu einer vollwertigen Flusskostenrechnung erweitert werden.
Wenn in einem weiteren Schritt diese Flusskosten mit den Kostenrechnungsdaten verknüpft und zu einer originären Prozesskostenrechnung ausgebaut werden, würde sich

¹⁹⁹ Nach KrWG sind Betriebe bei Überschreiten bestimmter Mengenschwellen besonders überwachungsbedürftiger Abfälle dazu verpflichtet, jährlich Herkunft, Menge und Endsorgungsweg der verschiedenen Abfallfraktionen strukturiert aufzubereiten, um sie im Bedarfsfall kurzfristig der Behörde zur Verfügung zu stellen.

eine direkte Integration der „Materialfluss-Realität“ in die „betriebswirtschaftliche Realität“ der Unternehmen eröffnen.

Ob allerdings eine solche direkte „Verdrahtung“ der verschiedenen Sichtweisen auf das Unternehmensgeschehen tatsächlich dazu führt, dass materialflussbezogene „Verwerfungen“ in der gemeinsamen betrieblichen Sprache (also monetarisiert) besser sichtbar werden, und damit ein Beitrag zu einer nachhaltigen Unternehmensausrichtung geliefert wird, ist aus Sicht der Projektmitarbeiter nicht abschließend vorauszusagen.

Es könnte durch die vermeintlich abschließende Lösung der Schnittstellenfragen zwischen materialer und buchhalterischer Sichtweise auch die Sensibilität für die weiterhin bestehenden Probleme abgeschwächt werden, wie z.B. für die deutlich unterschiedlichen Zeit- und Zielhorizonte der verschiedenen Betrachtungsweisen (z.B. Quartalsergebnisse versus mittelfristige Versorgungs- und Absatzsicherung) oder für die grundlegenden Fragen nach der ökologischen Kostenwahrheit für Einsatzmaterialien und Entsorgungswege.

3. Die ermittelten Kennzahlen können als Basis für ein regionales bzw. branchenweites „Benchmarking“ zwischen gleichartig strukturierten Betrieben oder Betrieben mit teilweise vergleichbaren Produktionseinheiten verwendet werden.

Bei den direkt aus den betrieblichen Daten zu bildenden Kennzahlen handelt es sich im Regelfall um Effizienzkennzahlen, d.h. es können durch solche Vergleiche substantielle Impulse zur Umsetzung einer Effizienzstrategie gegeben werden. Ob im Einzelfall dann tatsächlich jeweils ein direkte Link zwischen Effizienzsteigerung und nachhaltiger Entwicklung gegeben ist, bedarf der Prüfung vor dem Hintergrund eines weiterreichenden Referenzsystems.

13 Produktgestaltungs- und Produktnutzungsstrategien - anspruchsvolle win-win-Beispiele des Stoffstrommanagements

13.1 Einführung in das Thema

Ausgereifte Unternehmensstrategien zur Produktgestaltung und Produktnutzung sind entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen. Im Rahmen unseres Forschungsprojektes wurden sie als wesentliche Einfluss- und Gestaltungsbereiche der (produktbezogenen) Stoffstromoptimierung identifiziert. Im Sinne eines nachhaltigkeitsorientierten Stoffstrommanagements von Produkten sind im Prinzip alle Prozesse der Produktion, Nutzung und Entsorgung so zu optimieren, dass sämtliche zu verwendenden sozialen, ökologischen und ökonomischen Ressourcen so effektiv wie möglich eingesetzt werden. Um dieses Ziel zu verfolgen, sind Managementinstrumente notwendig, die diese Neu-Orientierung im Unternehmen unterstützen.

Der Lebensweg eines Produktes beschreibt die Phasen Entwicklung, Produktion, Vertrieb, Nutzungsphase mit Wartung und Instandsetzung bis zum Ende der ersten Nutzenphase (Abbildung 72).

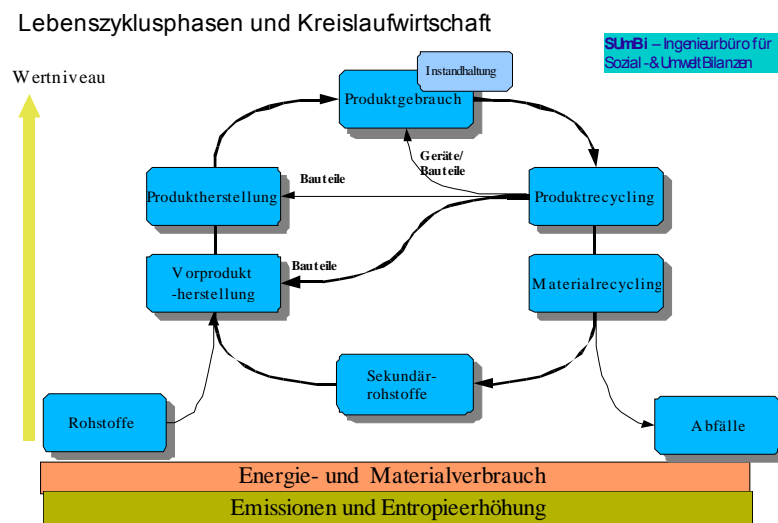


Abbildung 72_Lebenszyklusphasen und Kreislaufwirtschaft

Daran anschließend folgen alternativ die Wieder-Verwendung des Produkts oder die Wieder-Verwertung seiner Materialien. Für ein nachhaltigkeitsorientiertes Stoffstrommanagement ist gerade das Wissen und der Austausch an den Schnittstellen zu jeweils anderen Teilbereichen im Lebenszyklus eines Produktes wesentlich. Ein überbetriebliches Stoffstrommanagement wird allerdings nur gelingen, wenn die beteiligten Unternehmen davon profitieren. Für Produktstrategien bedeutet das die Notwendigkeit einer weiter gehenden Kommunikation unter diesen Akteuren über partielle Ansätze hinaus (Gottschick et al. 2004).

Auf der Grundlage der hohen strategischen Bedeutung von Produktstrategien haben wir drei Bereiche genauer untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und auch der z. T. damit verbundenen praktischen Erprobungen werden im Folgenden dokumentiert.

Im Bereich der Produktgestaltung haben wir Regeln zur *Modularisierung der Baustruktur* mit

dem Ziel der Lebenszeitoptimierung (weiter)entwickelt und mit einigen Unternehmenskontakten diskutiert. In Zusammenarbeit mit einem Partnerunternehmen konnten diese Regeln der Modularisierung anhand eines Produktes auch einmal erfolgreich durchgespielt werden.

Im Bereich der Produktnutzungsstrategien haben wir die ökologischen Auswirkungen unterschiedlicher Vertragsgestaltungen diskutiert (Verkauf, Leasing, Rental) und an einem konkreten Beispiel im Bereich des Flottenmanagements wurden *Energiebilanzen* (KEA) verschiedener Produktnutzungsalternativen erstellt und verglichen.

Mit Blick auf die Dauer der Produktnutzung wurde der Umfang des *Gebrauchtmaschinenmarkts* in Deutschland untersucht und dabei grobe Abschätzungen sowohl der Massenströme als auch der Geldströme auf diesem bisher wenig transparenten Markt erstellt.

Durch eine optimierte *Produktgestaltung* können mit vergleichsweise geringem Kostenaufwand erhebliche Kostenminderungen in der Produktion, im Betrieb und in der „Entsorgung“ erschlossen werden (vgl. Abbildung 73). Ein bedeutendes Hemmnis bei der Erschließung dieser Potenziale, die ja nicht nur kosten- sondern auch umweltrelevant sind, ist das zeitliche und akteursbezogene Auseinanderfallen von Aufwand und Gewinn. Der Produkthersteller hat in der Regel keine Motivation, einen höheren Aufwand in ein Ressourcen schonendes Produkt zu investieren, wenn dies nicht vom Markt honoriert wird. Als ein Lösungsansatz bieten sich andere *Nutzungsformen* an, bei denen die Produkte im Besitz bzw. im Eigentum der Hersteller verbleiben, in denen der Nutzer das Produkt nur zeitweilig nutzt, oder gar nur die gewünschte Funktion erwirbt. Trotzdem blöeibt der Bereich der Produktgestaltung und -nutzung, wie alle im Nachhaltigkeitskontext betrachteten Strategien, der Problematik unterworfen, dass die Anforderung, Erfolge in allen drei Nachhaltigkeitsdimensionen zeitgleich zu erzielen, Gefahr läuft, zu einer Handlungs lähmung durch Überkomplexität zu führen.

Selbstverständlich müssen auch derartige Schritte im Rahmen eines integrierten Bewertungsprozesses hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeitswirkungen bewertet werden. In Kapitel 3 wurde auf diese Bewertungsproblematik schon ausführlich eingegangen. Jetzt geht es darum, konkret für die von uns angestrebten bzw. erreichten Veränderungen Bewertungskriterien zu formulieren.

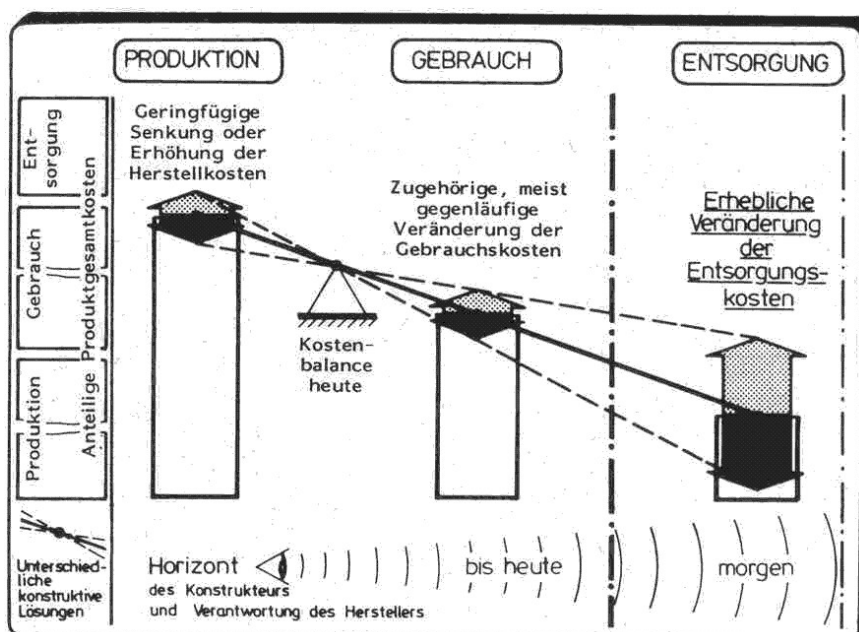


Abbildung 73_Veränderungsmöglichkeiten und Effekte bei der Produktgestaltung (Steinhilper 1995: 4/3.1.2)

An Schritte zur nachhaltigkeitsorientierten Produktgestaltung wurden folgende Kriterien angelegt (Brahmer-Lohss 2001: 7 ff.):

- Reduzierter bzw. optimierter Energie-, Stoff- und Arbeitseinsatz über den gesamten Produktlebenszyklus, also während der Phasen Herstellung, Nutzung und Aufarbeitung bzw. Aufbereitung
- Verringerung von unerwünschten Emissionen
- Ersatz von nicht- bzw. schwer aufzubereitenden Schadstoffen
- Getrennt-Haltung von Rohstoffen bzw. Baustoffen, um Wieder- bzw. Weiterverwertung zu ermöglichen
- Vermeidung von Störstoffen durch Getrennt-Haltung der Stoffströme (Bsp. Kupfer im Stahl)

Ein Weg zur Erfüllung dieser Kriterien liegt darin, die Stoffe weitgehend im Kreis zu führen. Ein Optimum mit Blick auf den Kreislaufgedanken auf stofflicher Ebene wäre eine weitestgehende (d. h. mindestens 90% ige) Rohstoffgewinnung aus Sekundärmaterial. Die notwendige Zuspiesung von ca. 10% wäre dann ausschließlich durch unvermeidbare dissipative Verlusten bedingt (vgl. dazu mit Blick auf Metalle Kapitel 8).

Betrachtet man den gesamten Produktlebenszyklus, so ist nach dem im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz niedergelegten Prinzip der Produktverantwortung das entwickelnde und herstellende Unternehmen für den gesamten Produktlebensweg und damit auch für die Kreislaufschließung verantwortlich.

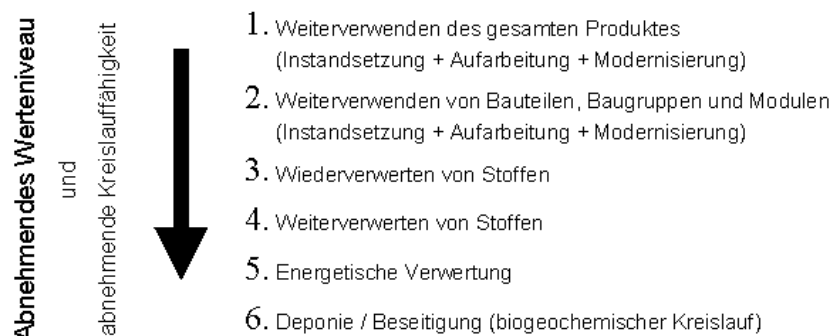


Abbildung 74_ Wertenniveaus der Kreislaufwirtschaft

Es geht aber nicht nur um Kreisläufe und um Recycling allgemein unter Mengengeichtspunkten. Unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten mindestens genauso wichtig ist die Produktqualität bzw. das erzielbare Recyclingniveau. Für Produkte ergibt sich daraus als ein mögliches Ziel, das Produkt so lange wie möglich auf hohem Wertenniveau zu halten (Erhalt des Mehrwerts der Produktgestalt). Das Ziel ist eine Ressourcenverminderung bei mindestens gleichem Nutzen. Dabei kommt der Wiederverwendung als einem Recycling auf hohem Niveau (Bauteil-, Baugruppen-, Modul- und Produktrecycling) sowie einer optimierten Instandhaltung oder gar der Modernisierbarkeit (up-cycling) eine wesentliche Bedeutung zu. Teilaspekte einer solchen Differenzierung sind in Abbildung 74 wiedergegeben.

13.1.1 Produktnutzungsstrategien

Der verstärkte Übergang vom Verkauf bzw. der Nutzung von Produkten zum Verkauf bzw. der Nutzung von Dienstleistungen gilt als Chance und Strategie für einen Übergang zu einer Ressourcen schonenderen Wirtschaftsweise (Stahel 1994, 192ff, u.a.). Ihm liegt die Idee zugrunde, dass durch den Verkauf nur des gewünschten Nutzens und nicht des Produktes selbst eine tendenzielle Dematerialisierung der Wirtschaft erreicht werden kann, wohingegen

durch den Verkauf von Produkten eine ressourcenintensive Wirtschaftsweise gefördert wird.

Bei unserem Zugang zu nachhaltigkeitsorientierten Produktnutzungsstrategien stehen gemäß der Ausrichtung auf die Metallwirtschaft die Angebote kommerzieller Unternehmen des Investitionsgüterbereichs im Zentrum. In der Literatur wird der entsprechende Themenbereich auch als „öko-effiziente Dienstleistungen“ bezeichnet. Damit entsteht der Eindruck, dass alle unter diesem Begriff subsumierten Dienstleistungen a priori einen ökologischen Vorteil aufweisen (Schrader 2001: 86). Dass dies so nicht immer der Fall ist, wird im Weiteren beschrieben und differenziert.

Idealtypische Formen der „öko-effizienten Dienstleistungen“ sind die Produkt-, Nutzungs- und Ergebnisdienstleistung (Abbildung 74).

öko-effiziente Dienstleistungen

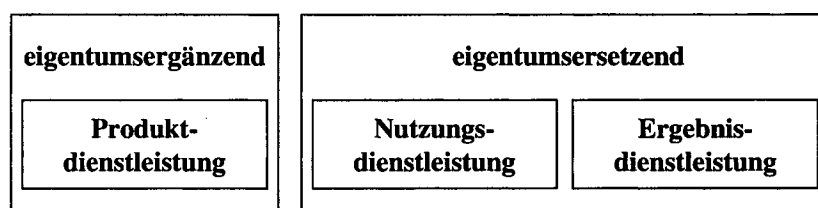


Abbildung 75_Idealtypische Formen „öko-effiziente Dienstleistungen“ (Schrader 2001:75 nach Bierter et al. 1996)

Die **Produktdienstleistung** ist eine Ergänzung zum eigentlichen Produkt. Durch Instandhaltung, Modernisierung und Reparatur wird die Funktionalität eines Produkts erhalten, erweitert bzw. wiederhergestellt und somit seine Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer verlängert. Zu dieser Dienstleistungsform gehören auch Anwendungsberatungen, bei denen der Anbieter dem Anwender hilft, das Produkt optimal einzusetzen. Hierunter fällt z. B. auch die von uns näher betrachtete „Flottenmaterialflussanalyse“ bei einem Hersteller von Flurförderfahrzeugen.

Nutzungsdienstleistungen sind eigentumsersetzende Dienstleistungen, bei denen der Nachfrager nur in den Besitz des Produktes kommt und damit den Nutzen selbst erzeugt (Schrader 2001: 78). Bekannte Beispiele sind Leasing, Vermietung, Sharing und Pooling²⁰⁰. Bei der *Langzeit-Nutzungsdienstleistung* ist das Produkt über die gesamte Nutzungsdauer im Dauerbesitz eines Nachfragers und wird erst danach an den Anbieter (Eigentümer) zurückgegeben (ein bekanntes Beispiel ist das Leasing von Kopiergeräten). Die *Kurzzeit-Nutzungsdienstleistung* wird in Anspruch genommen, wenn das Produkt nur für die jeweilige Gebrauchsdauer im Besitz des Nutzers sein soll (z.B. Autovermietung). Das Produkt kann damit seriell von mehreren Nutzern genutzt werden (Schrader 2001: 81).

Bei den **Ergebnisdienstleistungen** erbringt der Nutzer nicht selbst die gewünschte Leistung, sondern kauft nur die Funktionserfüllung. Ein typisches Beispiel ist der gesamte Bereich des Handwerks, bei dem die Funktion (z.B. neue Tapeten) mit der Arbeitsleistung, dem Know-How, den Geräten und dem Material des Anbieters erbracht wird.

In vielen Strategien zu öko-effizienten Dienstleistungen steht die Verlängerung der Produktlebensdauer im Mittelpunkt. Die These dabei ist, dass, wenn die Produkte länger genutzt werden, weniger neue Produkte hergestellt werden müssen, wodurch die Umwelt geschont wird. Die Begrifflichkeiten werden in diesem Zusammenhang leicht durcheinander

²⁰⁰Zu den rechtlichen Unterscheidungen siehe unseren Zwischenbericht Brahmer-Lohss et al 2000 (www.nachhaltige-metallwirtschaft.de)

geworfen. Wir orientieren uns in dieser Arbeit an den Begriffsdefinitionen, wie sie von Hirschl et al. 2000 verwendet wurden.

Die *Lebensdauer* eines Produkts ist die Zeit seiner physischen Existenz, in der das Produkt theoretisch seine Funktion erfüllen könnte (Abbildung 76).

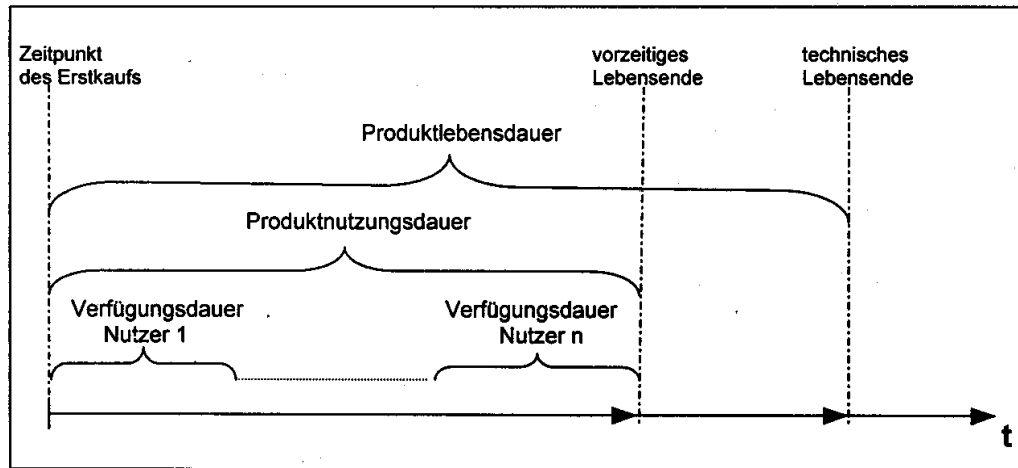


Abbildung 76_ Lebens-, Nutzungs- und Verfügungsdauer (Hirschl et. al.2000:13)

Die technische Lebensdauer kann natürlich viel länger sein, als die eigentliche *Produktnutzungsdauer*, die oft nicht durch das technische, sondern das ökonomische oder soziale Lebensende bestimmt wird. Personalcomputer oder Mobiltelefone sind typische Beispiele von Produkten, bei denen die *Produktnutzungsdauer* wesentlich kürzer ist als die technische *Produktlebensdauer*. Ein Neukauf dieser Geräte wird i.d.R. durch den technischen Fortschritt oder gestalterische Veränderungen motiviert, der die alten Geräte trotz gleich bleibender Funktionsfähigkeit als nicht mehr richtig gebrauchsfähig erscheinen lässt. Die *Produktnutzungsdauer* kann sich insgesamt auf verschiedene Nutzer mit zeitlich serieller *Verfügungsdauer* verteilen. Die Zeit der eigentlichen Benutzung wird als *Gebrauchsdauer* bezeichnet, die ggf. von einer *Ruhezeit* unterbrochen sein kann (Hirschl et al. 2000:12f.). Die *Gebrauchsdauer* ist also die Zeit, in der das Produkt seine primäre Funktion tatsächlich erfüllt. Bei Geräten, die im Dauerbetrieb arbeiten (z.B. Kühlschränke), wird die *Gebrauchsdauer* etwa so lang wie die *Nutzungsdauer* sein. Bei anderen Geräten (z.B. Staubsauger) wird die *Gebrauchsdauer* jedoch erheblich kleiner als die *Nutzungsdauer* sein.

Um die Umweltauswirkungen im Sinne einer Lebenszyklusanalyse vergleichbar zu machen, muss die funktionelle Einheit des Produkts präzise gefasst werden. Zum einen, indem die Belastung des Produkts berücksichtigt wird (ein Gabelhubwagen in einer Fischverarbeitung wird bei gleicher Transport- und Hubleistung durch die aggressive Atmosphäre stärker belastet als in einem Versandhauslager) und zum anderen, indem das Nutzungspotential (Kapazität) als Vergleichsgröße herangezogen wird.

Die hier verfolgten *Produktnutzungsstrategien* zielen darauf ab, die tatsächliche Nutzenleistung eines Produkts zu steigern, indem sie a) die *Gebrauchsdauer* erhöhen und *Ruhezeiten* verringern (sharing, pooling), b) die *Nutzungsdauer* verlängern (Modernisierung, aufrüstbare Konstruktion, „zeitlose“ Gestaltung) und c) die *Lebensdauer* erweitern (Wartung, Instandhaltung, langlebige Konstruktion).

Im übernächsten Kapitel wird unser praktisches Vorgehen näher beschrieben. Wir haben eng mit einem Flurförderfahrzeughersteller zusammengearbeitet und mit Hilfe einer orientierenden Energiebilanz die ökologischen Effekte der produktbegleitenden Dienstleistung „Flottenmaterialflussanalyse“ und der eigentumsersetzenden Nutzungsdienstleistung (Rental) untersucht.

Für eine Kreislaufwirtschaft, die nicht nur die Materialien weitestgehend im Kreis führt, sondern auch die funktionale Wertigkeit von Produkten und Bauteilen im Rahmen eines Produktrecyclings möglichst optimal erhält, ist ein funktionierender Markt für gebrauchte Produkte und Bauteile unabdingbar. Eine unserer Thesen zu Beginn des Projekts war, dass der Gebrauchtmaschinenmarkt durch **Internetbörsen** belebt, erweitert und stabilisiert werden kann. Recherchen und Befragungen von Branchenexperten haben jedoch ergeben, dass der Markt schon ausreichend mit funktionsfähigen Internetbörsen ausgestattet ist. Im Investitionsgütermarkt haben diese Börsen zudem nur eine „Schaufensterfunktion“, da die Investition in eine (Gebraucht-)Maschine Detailwissen über Leistungsfähigkeit, Einsatzbedingungen und Zustand benötigen, die für eine erfolgreiche Vermittlung das persönliche Vertrauen in den Verkäufer unabdingbar machen. Aufbauend auf der vorgefundene Anzahl von Internetbörsen für Gebrauchtmaschinen sind wir dann der Frage nachgegangen, welche Werte und Massen im Gebrauchtmaschinenmarkt in Deutschland umgesetzt werden. Wir mussten schnell feststellen, dass zwar viele Akteure ebenfalls Interesse an dieser Fragestellung haben, dass jedoch keine öffentlich zugänglichen Daten diesbezüglich vorhanden sind. Wir haben daher auf der Basis von Experteninterviews, Literaturrecherche und zugängliche statistischen Daten eine Abschätzung über die Werte und Massen des Gebrauchtmaschinenmarkts vorgenommen.

13.1.2 Potenziale und Grenzen öko-effizienter Dienstleistungen

Produktnutzungsstrategien sind also ein viel versprechender Ansatz im Rahmen von Nachhaltigkeitsstrategien. Aber auch sie müssen sich selbstverständlich einer kritischen Bewertung stellen. Am Beispiel „Leasing“ soll deshalb im Folgenden diskutiert werden, unter welchen Bedingungen Nutzungsdienstleistungen zu einer größeren Ressourceneffizienz führen können, im Vergleich zum Kauf eines Produktes²⁰¹.

Beim **Leasing** bleibt das Leasingobjekt im Eigentum des Leasinggebers (Hersteller oder Leasinggesellschaft). Der Nutzer zahlt an den Leasinggeber für einen festgelegten Zeitraum eine monatliche Leasingrate (Miete). Nach Ende der Nutzung durch den Leasingnehmer geht das Objekt wieder zurück an den Leasinggeber.

Leasing wird im Rahmen des Themenbereichs „öko-effizienter Dienstleistungen“ häufig als ein Instrument zur Erhöhung der Ressourceneffizienz gesehen. Diese Annahme findet in folgenden drei Betrachtungen Ausdruck:

1. Traditionell verdienen Hersteller am Verkauf möglichst vieler Produkte. Dadurch haben Unternehmen einen Anreiz ihren Marktanteil zu vergrößern und Produkte mit „eingebauter Veraltung“ herzustellen (Fishbein et al. 2000). Leasing von Produkten wird als Instrument gesehen, das dem Hersteller die Möglichkeit gibt, während der Nutzung (und zusätzlich an der Wartung) von Gütern zu verdienen. Hierdurch erhält der Hersteller einen Anreiz, langlebige Produkte zu konstruieren, d.h. Produkte, die robust, wartungsfreundlich, reparaturfreundlich und modernisierbar und darüber hinaus sparsam im Betrieb sind. Es eröffnet sich für den Hersteller also eine Option zur Ausweitung der Geschäftstätigkeit auf die Wartung und Reparatur von Gütern.

Fishbein et al. zeigen in ihrer Untersuchung allerdings, dass Leasing allein kein hinreichendes Instrument ist, um Veränderungen in der Produktgestaltung zur Verbesserung der Ressourceneffizienz zu bewirken. Um diese zu erreichen, sind meist weiter gehende Veränderungen des Produktdesigns nötig, z.B. hinsichtlich der verwendeten Materialien und der Konstruktion (Fishbein et al. 2000). Derartige Veränderungen des Produktdesigns in Hinblick auf Vermeidung von Abfällen, leichtere Wiederverwendbarkeit, Modernisierbarkeit und besseres Recycling von Materialien basieren neben dem Eigentum und der Verantwortung des Herstellers an genutzten Produkten wesentlich auf der

²⁰¹Ausführlicher dargestellt, auch mit einer Beschreibung der ökonomischen Auswirkungen des Leasing aus Sicht von Leasinggeber und Leasingnehmer, ist dies im Zwischenbericht Brahmmer-Lohss 2000 Kapitel 2.8.3.

Unternehmensorganisation, dem Management und auf Engagement im Umweltschutz. Ein gutes und häufig zitiertes Beispiel hierfür ist Xerox. Aufgrund großer Mengen an über Leasing-Verträge zurückgenommenen Produkten hat Xerox große Anstrengungen unternommen, den Wert dieser zurückgenommenen Produkte zu nutzen. Hierfür wurde der Unternehmensbereich des end-of-life-Managements (Sekundärmarkt, Abfallmanagement) mit dem Produktdesign verbunden. Hieraus resultierten diverse Veränderungen des Produktdesigns wie die Reduktion der Materialvielfalt und der Teileanzahl sowie die Vereinheitlichung von Komponenten verschiedener Gerätetypen oder Serien, so dass Teile eines Produkts für die Wiederaufarbeitung eines anderen genutzt werden konnten. Die wieder aufgearbeiteten Teile kommen – integriert in Produkte – wieder neu in den Markt (Fishbein et al. 2000: 7, 27). Fishbein et al. zeigen, dass Unternehmen, die die Verbindung zwischen End-of-life-Management und Produktdesign nicht zu realisieren in der Lage sind, keine Designinitiativen aufgrund ihrer bestehenden Verantwortung für die Entsorgung anstoßen (ebd.: 7ff.).

2. Beim Leasing bleibt das Leasingobjekt im Eigentum des Herstellers. Der Hersteller erhält es damit nach Ende der Nutzung zurück und ist für die Verwertung zuständig (erweiterte Produzentenverantwortung). Hierdurch wird ein Anreiz an die Hersteller zur Optimierung der Verwertung geschaffen (recyclinggerechte Konstruktion, Wiedergewinnung von Wertstoffen, Entnahme von Problemstoffen, Weiternutzung von funktionstüchtigen Bauteilen). Weiter werden die Kommunen von der Entsorgungsaufgabe entlastet (Fishbein et al. 2000).

Wenn der Hersteller über ein Leasing-Programm seine Produkte zurückerhält, steigert dies seinen Anreiz, die Entsorgungskosten zu senken (Internalisierung der Entsorgungskosten). Nach Fishbein kommen aber nicht alle verleaste Produkte zurück, vielmehr gehen viele auf mehreren Wegen dem Kreislauf verloren. Weiter wird der Hersteller in der Regel die für ihn billigste Option zur Entsorgung wählen, die durchaus die Deponierung sein kann. Mit Blick auf die Rücknahme und hochwertige Verwertung von Produkten sind gesetzliche Rücknahmeverpflichtungen daher eine weitergehende Maßnahme (Rücknahmequoten und Vorgaben zur Hochwertigkeit der Verwertung) (Fishbein et al. 2000: 11).

3. Die Intensität der Nutzung von Produkten, die zeitlich unteroptimal genutzt werden (z. B. Güter wie Bohrmaschine, Staubsauger, Waschmaschine aber auch PKW) kann durch intelligente Leasingkonzepte verbessert werden. Wenn mehrere Nutzer sich ein Produkt teilen, werden zum einen die Ressourcen zur Herstellung der eingesparten Produkte gespart. Zusätzlich kann die Nutzung durch den Leasinggeber professionalisiert und können dadurch weitere Optimierungspotentiale erschlossen werden (z.B. ergibt sich der ökologische Vorteil des Waschens im Waschsalon im Wesentlichen durch die Vorteilhaftigkeit der Wassererwärmung durch Gas gegenüber Strom im Privathaushalt (Hirschl et al. 2000: 13).

Bei Produkten, die von einem Nutzer zeitlich unteroptimal genutzt werden, kann eine geteilte Nutzung (Operating-Leasing, Sharing) sinnvoll sein. Dies hängt ab von der Logistik, der ökonomischen Rentabilität und den Nutzerwünschen. Auch das Teilen von Produkten stellt Anforderungen an die Art der Produkte und deren Nutzung, denn nicht alle Produkte lassen sich sinnvoll teilen (z.B. Kaffeemaschinen, extrem preiswerte Produkte). Inwieweit der Ressourcenverbrauch durch die geteilte Nutzung verringert wird, hängt neben der Steigerung der Nutzungsintensität (Verringerung der Anzahl der Produkte) von dem Effizienzgewinn durch den Einsatz halbgewerblicher oder gewerblicher Produkte oder Verfahren ab sowie auch von der Logistik (Anfahrten von Kunden bzw. Hol- und Bring-Dienste) (Hirschl et al. 2000: 85f).

Bei häufiger Produktinnovation und hoher Nachfrage nach dem jeweils aktuellsten Produkt ist eine hohe Fluktuation der Produkte im Pool anzunehmen, wie z.B. bei der Autovermietung. Hier kann eine Ressourcenschonung erreicht werden, wenn die angebotenen Produkte als Gebrauchtgeräte weitergenutzt werden, sie modernisierbar sind und bei ausrangierten Produkten ein weitgehendes Bauteilrecycling auf hoher Wertschöpfungsebene praktiziert wird (dazu auch: Scherhorn 2000: 15).

Hirschl et al. ermittelten spezifische Umweltentlastungen in der Größenordnung von Faktor 1,5 bis 2 bei der gemeinsamen Nutzung von Waschmaschinen in einem Waschsalon. Die Umweltentlastungen sind damit nicht so hoch, wie bisher angenommen (Hirschl et al. 2000b: 11). Die Hauptentlastung wird dabei durch die Nutzung von halbgewerblichen Maschinen und die effizientere Nutzung des Primärenergieträgers Erdgas erreicht. Einsparungen bei der Herstellung von Waschmaschinen (d.h. durch die Herstellung weniger halbgewerblicher gegenüber vieler Haushaltsmaschinen) fallen dabei weniger ins Gewicht. Negativ zu verbuchen sind die Transporte mit dem Auto zum Waschsalon. Sie machen aber nur ein Fünftel der Energieverbräuche eines normalen Waschvorganges aus. Hirschl et al. sehen weiter eine offene Frage darin, inwieweit zusätzlich gegenläufige Mengeneffekte (Mehrnutzung durch die Mietgelegenheit: z.B. zusätzliche Nutzung eines Trockners) oder nachgelagerte Einkommenseffekte (Verwendung der freiwerdenden Kaufkraft für umweltbelastende Zwecke) eine Rolle für die Umweltentlastung spielen (Hirschl et al. 2000: 13). Zumindest in den vergangenen 50 Jahren wurde die Produktivitätssteigerungen der Arbeit - etwa um den Faktor 4 - fast ausschließlich zugunsten der Erweiterung der Konsummöglichkeiten genutzt und kaum zu einer Reduktion der Lebensarbeitszeit. Daher beurteilt Zundel den ökologischen Ertrag einer Ressourcenproduktivitätssteigerung durch Nutzungsintensivierung recht skeptisch (Zundel 2000: 25).

13.1.2.1 Zwischenfazit

Nutzungsdienstleistungen wie z.B. Leasing sind kein Garant für Ressourcenschonung. Es gibt viele Beispiele, bei denen das Leasing gegenüber dem Kauf kaum ökologische Vorteile erkennen lässt. Außerdem können Verträge für Leasing und Kauf individuell gestaltet werden, wodurch die Grenzen zwischen den verschiedenen Vertragsformen fließend sind. Eine Produktrücknahme wie beim Hersteller-Leasing kann z. B. auch durch Verkauf mit vereinbarter Rücknahme nach der Nutzung erreicht werden. Der Zusammenhang zwischen einem Ressourcen schonendem Wirtschaften und einer bestimmten Vertragsgestaltung ist in keiner Richtung kausal.

Um wirklich ressourceneffizient zu Wirtschaften sind tief greifende Veränderungen bei der Materialauswahl und beim Produktdesign notwendig. Ob diese angegangen werden, hängt nicht zuletzt auch von der Unternehmensphilosophie und vom Engagement der Mitarbeiter eines Unternehmens ab.

Folgende Aspekte könnten insofern einen größeren Einfluss auf die Ressourcenschonung haben:

- Verankerung des Umweltschutzes als Unternehmensziel
- Orientierung und Umstellung von Management und Organisation auf ressourcenschonendes Wirtschaften, insbesondere die Verknüpfung von End-of-Life-Management und Produktdesign.

„Leasing“ ermöglicht den Herstellern jedoch, an der Nutzung von langlebigen Produkten zu verdienen und nicht nur an dem Verkauf möglichst vieler kurzlebiger Produkte. Durch die Rücknahme gleichartiger Geräte beim Hersteller-Leasing werden die Entsorgungskosten tendenziell internalisiert und die Möglichkeiten zum hochwertigen Recycling durch den Hersteller werden verbessert. Ob diese Möglichkeiten vom Hersteller allerdings realisiert werden, hängt entscheidend von seinem Engagement ab. Gesetzliche Regelungen wie z.B. gesetzliche Rücknahmeverpflichtungen können daher erfolgreicher sein in Hinblick auf Ressourcenschonung, als die Auswirkungen der Marketingform „Leasing“.

Um einen größtmöglichen ökonomischen Nutzen zu erzielen, sollten ein Engagement für ökologisches Design und die Auswahl einer angepassten Vertragsgestaltung / eines angepassten Nutzungskonzeptes Hand in Hand gehen.

Eigentum ersetzende Dienstleistungen sind also nicht per se nachhaltig. Für positive

Wirkungen bezüglich Produktgestaltung und Kreislaufwirtschaft müssen weitere Bedingungen erfüllt sein. Diese bewegen sich schwerpunktmäßig im organisatorischen Bereich, Innovationsfähigkeit stellt sich auch hier als einer der Schlüssel heraus für ein nachhaltigeres Wirtschaften (siehe Kapitel 5).

13.2 Nachhaltigkeitsorientierte Produktgestaltung

13.2.1 Kreislauforientierte Produktgestaltung als Bestandteil nachhaltigkeitsorientierter Ansätze für Unternehmen

Grundlegende Entwicklungen auf den Märkten in den vergangenen Jahrzehnten, wie die Intensivierung des Wettbewerbs durch Globalisierung und in diesem Zusammenhang auch die Verschiebungen von angebotsdominierten Verkäufermärkten hin zu nachfragedominierten Käufermärkten sowie die immer kürzer werdenden Innovationszyklen und der Kostendruck, zwingen die Unternehmen zum sowohl immer effizienteren als auch immer flexibleren qualitätsorientierten Produzieren. Hieraus kann sich auch die Motivation vieler Unternehmen zu einem Ressourcen schonenderen Umgang mit Stoffen und Energie ergeben. Materialeinsparung bei der Produktion, Verringerung von Produktionsabfällen und Minimierung der Abfallmengen am Lebensende eines Produktes fallen einerseits als Kosten ins Gewicht, andererseits geht von Abfällen und Gefahrstoffen das nicht unerhebliche Risiko einer ‚öffentlichen Skandalisierung‘ aus, ein Risiko, für das insbesondere Markenunternehmen mittlerweile sehr sensibel geworden sind. Darüber hinaus wird die Wirtschaft durch das 1996 in Kraft getretene Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, kurz: KrW-/AbfG) auf einen schonenden Umgang mit Ressourcen verpflichtet. Produktentwickler und -hersteller tragen prinzipiell die Verantwortung für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft. Die *Produktverantwortung* umfasst insbesondere die Entwicklung und Herstellung von Produkten. Danach sollen diese mehrfach verwendbar, technisch langlebig und nach Gebrauch ordnungsgemäß und schadlos verwertbar sein. Es gehört aber auch die Rücknahme der Produkte sowie deren nachfolgende Wieder/Weiter-Verwendung dazu (KrW-/AbfG 1999, §22).

Der Gedanke der Kreislaufwirtschaft (Abbildung 77) bezieht sich prinzipiell auf Produkte jedweder Komplexität, also vom Mehrwegflaschen-System über das Kopiergerät bis hin zum Flugzeug. Die Konzepte für seine Umsetzung sind jedoch, je nach Nutzungsart, Aufbaustruktur und Grad der Komplexität des Produktes sehr unterschiedlich.

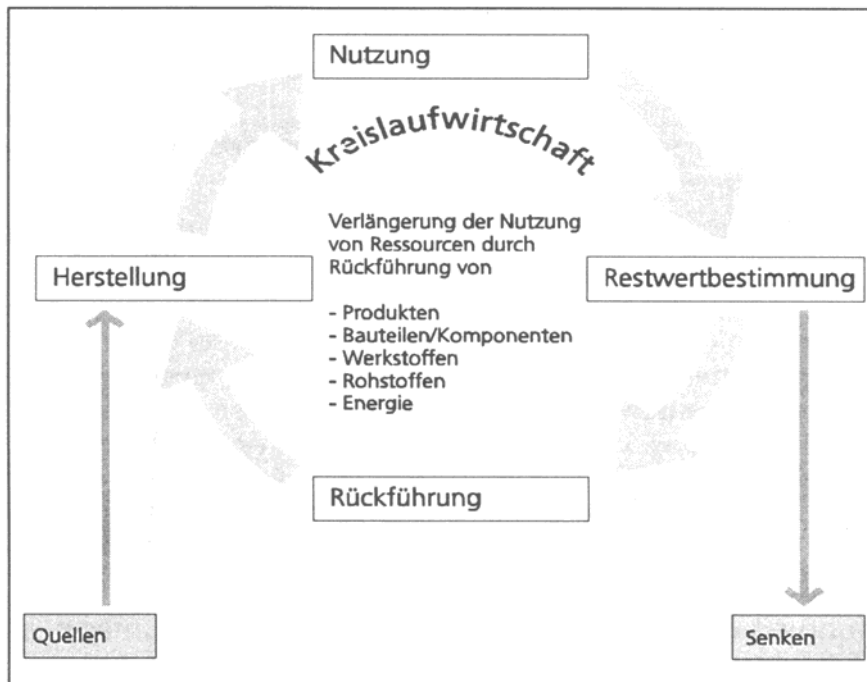


Abbildung 77_Kreislaufwirtschaft (Schubert et. al.1997 S.13)

Eine recyclinggerechte Produktgestaltung ist die erste Etappe auf dem Weg zu einer kreislaufgerechten Gestaltung. Sie behandelt vorwiegend die Frage der Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen, Baugruppen bzw. Modulen und deren stoffliche Verwertung am Ende eines Produktlebens (PAHL, BEITZ 1997, S. 415-426).

Kreislaufgerechte Produktgestaltung geht aber noch einen entscheidenden Schritt weiter. Sie hat die Optimierung des gesamten Produktlebens zum Inhalt, also von der Wiege bis zur Wiege²⁰². Sie hat die Optimierung der Nutzenphase eines Produktes zum Ziel und die Etablierung von Produktkreisläufen auf *hoher* Wertigkeitsstufe, also auch mit weitestgehender Produktaufarbeitung. Mit Blick auf diesen weiter reichenden Ansatz wird im Folgenden der Begriff der kreislaufgerechten Produktgestaltung verwendet.

Dass dieser Ansatz noch weit davon entfernt ist, allgemeiner Grundsatz der Produktgestaltung zu sein, illustrieren beispielhaft folgende Zahlen: In den Jahren 1998/99 fielen in der EU 8 Mio. Mg Elektro(nik)-Altgeräte an. 90 % wurden davon deponiert bzw. verbrannt, also thermisch verwertet [NIEWÖHNER, RENZ 2000, S.51]. Der Anteil der Weiter- und Wiederverwendung nach Reparatur oder Aufarbeitung, also nach Durchlaufen eines Prozessschrittes zur Realisierung einer höherwertigen Kreislaufgestaltung lag bei lediglich 10%.

Als Anforderungen an eine kreislaufgerechte Produktgestaltung werden die in Kapitel 13.1 formulierten Kriterien und Leitlinien zugrunde gelegt. Für Produkte ist eine Optimierung des Kreislaufgedankens z. B. dadurch zu erzielen, dass das Produkt möglichst lange auf hohem Wertenniveau gehalten wird (Erhalt des Mehrwerts der Produktgestalt). Ziel ist eine Verminderung des Ressourcenverbrauchs bei mindestens gleichem Nutzen. Dabei kommt dem Recycling auf hohem Niveau (Bauteil-, Baugruppen-, Modul- und Produktrecycling), neben der optimierten Instandhaltung und Modernisierbarkeit eine wesentliche Bedeutung zu.

²⁰² Ursprünglich war das Begriffspaar „von der Wiege bis zur Bahre“ prägend für die vollständige Berücksichtigung, des gesamten Produktlebensweges, von der Herstellung bis zur Entsorgung. Um aber auch das Recycling in geschlossenen Kreisläufen anzudeuten, wird inzwischen eher „von der Wiege bis zur Wiege“ gesprochen, also bis zur erneuten Herstellung eines Produkts.

Kreislaufgerechte Produktgestaltung verfolgt abgeleitet aus diesen Prinzipien das Ziel einer Lebenszeitoptimierung von Produkten. Da Produkte oft aus mehreren Komponenten aufgebaut sind, ist für jede dieser Komponenten eine eigene differenzierte Betrachtung nötig.

Die Kreislaufeignung hängt weitgehend ab von der Möglichkeit zur Differenzierung und Strukturierung des gesamten Produktes in Bauteile, Baugruppen und Module hinsichtlich dieser Fragestellung. Kreislaufgerechtheit bedeutet, *die Möglichkeit zum „Behandeln“ jeder Komponente in den für ihre technische und wirtschaftliche Wirksamkeit optimalen Zeitintervallen*. Die wesentlichen Behandlungsschritte hierfür sind die *Instandhaltung*, das *Recycling* und die *Modernisierung*:

- Die *Instandhaltung* gewährleistet während dem ersten Lebenszyklus diese Anforderung. Je nach Verschleiß, Ermüdung etc. werden Bauteile, Baugruppen oder Module entsprechend „behandelt“.
- Am Ende der ersten Lebensphase sind der Recyclingansatz und die Modernisierungsstrategie für eine Kreislaufoptimierung von entscheidender Bedeutung. Dies kann den Schritt zu einem weiteren Lebens(nutzungs)zyklus bedeuten. Mit welchem Ressourcenverlust dieser Schritt verbunden ist, oder offensiv formuliert, ob ein Erhalt des Produktes bzw. möglichst vieler Komponenten auf hohem Wertniveau stattfindet, hängt wesentlich ab von den Gestaltungsmöglichkeiten zum Recycling bzw. zur Modernisierung.

Instandhaltung, Recycling und Modernisierung, als die entscheidenden Merkmale einer kreislaufgerechten Produktgestaltung, werden im Folgenden dargestellt und die Anforderungen für den Gestaltungsprozess formuliert.

13.2.2 Unternehmenszugang im Bereich der Produktgestaltung

Innerhalb eines produzierenden Unternehmens verfolgen die Abteilungen unterschiedliche, partielle Zielstellungen und haben dadurch auch unterschiedliche Bedeutung für die strategische Ausrichtung im Rahmen einer nachhaltigkeitsorientierten Produktstrategie (vgl. Abbildung 4).

Wenn es um die Umsetzung neuer Produktansätze geht, die eine Erweiterung der *technischen* Ausgestaltung des Produkts bedingen, ist zumindest die Entwicklungsabteilung entscheidend gefragt. Ihre Bereitschaft zu neuem und kreativem Arbeiten und ihre Innovationsfähigkeit ist eine der Grundlagen für die Realisierung neuer Produktkonzepte. In der Konstruktionsabteilung werden die späteren Produkteigenschaften weitgehend festgelegt, die in allen Produktlebensphasen (Fertigung, Nutzung, incl. Instandsetzung, mögliches Recycling und Entsorgung) Auswirkungen haben. Dadurch hat die Konstruktionsabteilung auch entscheidenden Einfluss auf die Eignung eines Produktes für eine hochwertige Kreislaufführung. Dies betrifft insbesondere die Ausgestaltung der Baustruktur, die Werkstoff- und Bauteilwahl und die Funktionsoptimierung. Der Aufwand, um die Demontage zu optimieren, die Trennung zu erleichtern und den Zerlegeaufwand zu reduzieren, wird entscheidend durch die Baugestalt bestimmt: z.B. als Ausgestaltung von *hierarchischer und / oder integrierter Baustruktur*, als *modularer Aufbau*, bei der Wahl der *Verbindungstechnik u.a.* Diese Anforderungen innerhalb einer Kreislaufstrategie können nur in Kooperation mit der Konstruktion erfolgreich angegangen, vorangetrieben und gelöst werden.

Für die Implementierung einer hochwertigen Kreislaufführung im Unternehmen wurde daher ein konstruktions- bzw. technologieorientierter Zugang, über die Konstruktions- bzw. Entwicklungsabteilungen gewählt. Dies war auch deswegen sinnvoll, weil das stoffliche Recycling zunehmend konstruktiv von Unternehmen berücksichtigt wird, es sich also „nur“ um eine Weiterentwicklung einer bereits wahrgenommenen und ansatzweise schon berücksichtigten Anforderung handelte.

Durch die von uns entwickelten Regeln zur Modularisierung konnte ein Impuls zu einem Paradigmenwechsel im Bereich der Produktstrategien vertärkt werden. Die Methode diente

somit im Wesentlichen als Kommunikationsinstrument. Über die Integration des Ansatzes in die VDI-Richtlinie 2221²⁰³ konnten darüber hinaus Anforderungen formuliert werden für jeden einzelnen Entwicklungsschritt, was den Konstruktionsprozess unmittelbar unterstützt.

Zur erfolgreichen Umsetzung der für viele Unternehmen noch weitgehend neuen Ansätze einer kreislaufgerechten Produktgestaltung bedarf es einer intensiven Kommunikation und Abstimmung im gesamten Unternehmen.

Beispielsweise sind weiter gehende Informationen über technische Recyclingmöglichkeiten und Lebenszyklusdaten zu Werkstoffen sowie Informationen zu weitergehenden Nutzungsmöglichkeiten bestimmter Bauteilen notwendig. Eine wichtige methodische Unterstützung für eine kreislaufgerechte Konstruktion bietet die Anwendung von Softwaretools, bzw. Datenbanken zur Auswahl von Materialien und Werkstücken mit der Möglichkeit, Fertigungs- und Recyclingwege mit Blick auf eine kreislauforientierte Bewertung auszusuchen bzw. verschiedene Optionen in Szenarien zu vergleichen.

Ökobilanzierungsprogramme (Umberto, GaBi, euromat etc.) haben sich vielfach als für den Konstruktionsalltag zu umfangreich erwiesen. Weniger differenzierte Programme, die Schnittstellen zur vorhandenen Konstruktionsumgebung (z.B. EDM-Systeme zu PPS-Systemen) haben, sind nicht auf dem Markt. In Forschungs- und Entwicklungsabteilungen von Industrieunternehmen sind zahlreiche selbst entwickelte oder angepasste EDV-tools anzutreffen. Für ein marktreifes Anwendungsprogramm (für den Maschinen- und Anlagenbau), das einen Variantenvergleich unterstützt, besteht hier ohne Zweifel Entwicklungsbedarf^{204, 205}.

13.2.3 Ansatz der Konstruktion

Die Konstruktion hat die zentrale Aufgabe, für technische Probleme Lösungen zu finden bzw. Lösungen zu entwickeln. Dem Konstruktionsprozess steht dazu ein Kanon an (Gestaltungs-)Methoden zur Verfügung. Neben der Richtlinie des VDI 2221 ff zur Entwicklung und Konstruktion technischer Systeme und Produkte gehören CAD/CAE, FEMA, QFD, DfE, und Wertanalyse und weiterführend PPS zu den gängigen Methoden. Dabei ist entscheidend, dass die Konstruktionsabteilung durch die von ihr entworfene Baustruktur alle späteren Eigenschaften des Produktes wesentlich prägt. Die Erfahrung und Innovationsfreudigkeit eines Konstrukteurs entscheidet damit wesentlich über die Reichweite neuer Produkte. Hochwertige Kreislaufeignung ist hierbei auch für die Konstruktion in vielen Teilen eine neue und zusätzliche Anforderung und muss somit auch neu in die Baustruktur integriert werden.

Durch die **Produktgestaltung** können in diesem Kontext allerdings mit vergleichsweise geringem Kostenaufwand erhebliche Kostenminderungen im Betrieb und in der „Entsorgung“ erschlossen werden (vgl. Abbildung 73).

13.2.4 Der Konstruktionsprozess

Welche Gestaltungsmöglichkeiten sich im Handlungsfeld der Konstruktionsabteilung eröffnen, kann in den grundsätzlichen Schritten des Produktentwicklungsprozesses nachvollzogen werden. Beim Konstruieren wird zum zielgerichteten Vorgehen die Gesamtaufgabe in einer Gesamtfunktion ausgedrückt. Der Begriff der Funktion beschreibt dabei den *allgemeinen oder gewollten Zusammenhang zwischen Input und Output eines Produktes* mit dem Ziel, die Aufgabe zu erfüllen. Es handelt sich also um den Nutzen des Produkts.

Die Gesamtfunktion wird zur Strukturfindung in einzelne Teilfunktionen unterteilt.

²⁰³VDI Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, 1993

²⁰⁴Vgl. dazu auch die Veröffentlichungen des Sonderforschungsbereich 392, TU Darmstadt, 1999

²⁰⁵Vgl. die Workshopdokumentation: *Nachhaltige Produktgestaltung im Spannungsfeld zwischen Kostendruck und Kundenwunsch*, Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg, 2002

Teilfunktionen werden in Haupt- und Nebenfunktionen eingeteilt. Während die *Hauptfunktionen* unmittelbar zur Erfüllung der *Gesamtfunktion* beitragen, so dienen die *Nebenfunktionen* der Unterstützung und Optimierung der Hauptfunktionen. Diese Strukturierung in Teilfunktionen und die Zusammenhänge der jeweiligen Teilfunktionen werden zusammengefasst in der *Funktionsstruktur* dargestellt. Für jede Teilfunktion werden die konstruktiven Lösungen zunächst gesondert erarbeitet. Das Aufstellen einer Funktionsstruktur erleichtert somit das Finden von Lösungen, da durch diese Strukturierung die Komplexität herabgesetzt wird (PAHL, BEITZ 1993: 39-48).

Bei der Funktionsstruktur handelt es sich nur um eine Systembeschreibung, dagegen legt die *Baustruktur* die Gliederung und den Zusammenhang fest zwischen den physischen Bauteilen, Baugruppen und Modulen, einschließlich der Verbindungen. Um die Funktionsstruktur in eine reale Baustruktur zu überführen, wird zunächst nach Wirkprinzipien gesucht, die diese Funktionen erfüllen. Der Wirkzusammenhang - bestimmt von physikalischen Effekten und festgelegten geometrischen und stofflichen Merkmalen - ist die Grundlage für die weitere Konkretisierung der Baustruktur.

In diesem Sinne sind für eine kreislaufoptimierte Produktgestaltung die zu Beginn der Produktentwicklung festgelegten Merkmale und Kriterien von der Funktionsstruktur auf die Baustruktur zu übersetzen. Merkmale im Sinne einer kreislaufgerechten Produktgestaltung sind die Wartungsfreundlichkeit, die Instandsetzungsgerechtigkeit, die Optimierung der Möglichkeit für eine Produktaufarbeitung, des stofflichen Recyclings bzw. der Aufbereitung und Verwertung und letztlich die Möglichkeit zur Modernisierung. Aus diesen Merkmalen sind konkrete Anforderungen an die Baustruktur des Produkts zu formulieren. Die folgende Tabelle gibt Beschreibungen von konkreten Anforderungen an die Produktgestaltung für diese Merkmale wieder. Für die Konstruktion stellt sich daraus die Aufgabe, aus diesen Anforderungen konkrete Baustrukturen und Bauteile zu entwickeln. Angelehnt an die VDI Richtlinie 2221 sind in diesem Sinne die in der Tabelle 36 zusammengefassten Anforderungen als Leitlinie zu verstehen, wie z. B. die bekannten Leitlinien zur Ergonomie, Montage, Sicherheit etc.

Tabelle 36 Anforderungen an die kreislaufgerechte Produktgestaltung

Merkmale der Kreislaufwirtschaft	Anforderung an die Produktgestaltung
Wartungsfreundlich	Verbindungen sollen gut lösbar und standardisiert sein, Bauteile sollen unbeschädigt bleiben.
	Verschleiß soll auf bestimmte und gut zugängliche Komponenten konzentriert werden.
	Verschleiß soll durch konstruktive Gestaltung sichtbar gemacht werden.
Instandsetzungs-gerecht	Die getrennt zu bearbeitenden Einheiten müssen sich in der Baustruktur wiederfinden (Lebensdauerklassen).
	Verbindungen sollen gut lösbar und standardisiert sein, Bauteile sollen unbeschädigt bleiben.
Optimierung der Produktaufarbeitung/ Remanufacturing	Verbindungen sollen gut lösbar und standardisiert sein, Bauteile sollen unbeschädigt bleiben.
	Die getrennt zu bearbeitenden Einheiten müssen sich in Funktions- und Baustruktur wiederfinden, Modularisierung.
	Baustruktur muss der Lebensdauer der Komponenten und den daraus resultierenden Zugriffsnotwendigkeiten (Reparatur, Aufarbeitung, Austausch) entsprechend gestaltet sein. Hierarchische Bauweise, Baumstruktur, kurzlebige außen (gut zugänglich), langlebige innen.
	Konstruktion ohne Angriffsflächen oder mit Schutzschichten vor Korrosion mit dauerhaftem Sicherstellen der Funktion von lösbaren Verbindungen.
	Hierarchische Baustruktur, räumlich großzügige Dimensionierung.
	Standardisierung der Bauteile und Verbindungselemente, offener Systemaufbau.
	Funktions- und Baustruktur sollen sich möglichst ohne Überschneidungen in funktionelle und fertigungstechnische Untereinheiten gliedern.
	Werkstoffe müssen mit vertretbarem Aufwand separierbar sein, Abstimmen von hierarchischer und integraler Baustruktur, Aufbereitung muss technisch und wirtschaftlich möglich sein, Verzicht auf Schadstoffe.
Optimierung des stofflichen Recyclings – Aufbereitung und Verwertung	Werkstoffe sollen hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften und technisch-wirtschaftlichen Möglichkeiten recyclingfähig sein.
	Einstoffprodukte sind zu bevorzugen bzw. entsprechend anderer Anforderungen die Anzahl an Werkstoffen auf ein geringstes Maß zu begrenzen.
	Wenn Werkstoffkombination nötig, nur solche Werkstoffe, die wirtschaftlich und in hoher Qualität zusammen zu verwerten sind.
	Wenn Schadstoffe unverzichtbar sind, sind diese gut zu kennzeichnen und leicht abtrennbar anzuordnen.
	Baustruktur für rationelle Vorzerlegung und Separierung von nicht gemeinsam zu verwertenden Baugruppen und Bauteilen anlegen – demontagegerecht, entsprechende Kombination hierarchischer und integraler Baustruktur
	Für eine Demontage und Separierung gut sichtbare Kennzeichnung aller Stoffe.
Modernisierungsgerecht	Werkstofflich, technologisch und konstruktiv langlebige Komponenten verwenden.
	Minimieren der Schnittstellen, Verbindungen unter den Baugruppen und Modulen werden nur über genau definierte Schnittstellen vollzogen, eine hierarchische oder teilhierarchische Struktur ist anzustreben.
	Funktionsmodule, Baugruppen und Schnittstellen hierarchisch angeordnet.
	Standardisierte und genormte, herstellerunabhängige Schnittstellen.

Die Differenzierung vom Gesamtzusammenhang zu Baugruppen und Bauteilen erfolgt in aufeinander aufbauenden Arbeitsschritten, in denen immer wieder die Erfahrungen und Fragestellungen anderer Abteilungen hinzugezogen werden. Durch die Zusammenführung der technologischen, wirtschaftlichen und marketingstrategischen Informationen kann dann eine Differenzierung der Produktstrategie vorgenommen werden. Z.B. werden die Schnittstellen für eine Recyclingstrategie gestaltet mit Blick auf die Fragen, welche Bauteile aufgearbeitet werden sollen (weil sie anschließend gut zu vermarkten sind), welche anderen Komponenten stofflich zu recyceln sind, bzw. ob ein höherwertiges Recycling (auf den Lebensweg bezogen) zumindest kostenneutral durchzuführen ist.

Die Konstruktionsabteilung erarbeitet hierfür Grundlagen indem sie Technologien (Verbindungstechnik, Langlebigkeit von Werkstoffen, realisierte bzw. zu realisierende Recyclingverfahren, Toxizität, Aufarbeitungsoption, Ausgestaltung von Schnittstellen) bezogen auf ihren Einsatz für eine hochwertige Kreislaufführung aussucht bzw. (weiter-) entwickelt.

13.2.5 Modularisierung – eine win-(win)-win-Strategie für produzierende Unternehmen?

13.2.5.1 Drei verschiedene Ansätze der Modularisierung

Als konkretes Projekt im Themenfeld der nachhaltigkeitsorientierten Produktoptimierung, wurde in Abstimmung mit dem Partnerunternehmen die konstruktive Modularisierung der Produktgestalt ausgewählt. Auf diese Weise konnte direkt an den „Alltags“-Diskurs der Konstrukteure angeschlossen werden.

Modularisierung kann ganz allgemein als ein Konzept verstanden werden, das ein Ganzes zusammengesetzt sieht aus einer Vielzahl von relativ unabhängigen kleinen Untereinheiten (PICOT1998, S. VI). Bezogen auf ein Produkt bedeutet Modularisierung die Strukturierung von Bauteilen und Baugruppen zu Modulen, und die Strukturierung der Module untereinander, so dass sie funktional und physisch relativ unabhängig voneinander stehen (GÖPFERT 1998, S.13). Module fassen Bauteile und /oder Baugruppen meist funktionseinheitlich zusammen, d.h. sie bilden eine in ihrer Funktion abgeschlossene Einheit. Über genau angepasst ausgestaltete Schnittstellen sind sie mit anderen Modulen verbunden. Durch die Minimierung von Querverbindungen zwischen den Modulen erreicht man eine Struktur niedriger Komplexität. Modularisierung wird sowohl zur Strukturierung technisch räumlicher, wie auch organisatorische Einheiten eingesetzt.

In der Praxis wird die Modularisierung bezogen auf die Produktentwicklung für (drei) verschiedene Ziele angewendet.

Zum einen wird sie als „Teil“-Methode bei der *Produktsystematisierung* eingesetzt, mit dem Ziel der Kostenreduzierung durch Varianten- und Bauteilreduzierung. Die Reduzierung der Anzahl an verschiedenen Bauteilen hat den positiven Effekt einer Vergrößerung der Losgrößen und ermöglicht dadurch eine effektivere Produktion. In Verbindung mit einer Plattformstrategie, die eine vielseitige Kombination gleicher Baugruppen zu verschiedenen Serien verbindet, wird sowohl die Komplexität der Produktentwicklung und Fertigung herabgesetzt als auch die Flexibilität gesteigert. Dies hat fast immer eine Verkürzung der Zeit für die Entwicklung und Maschineneinrichtung der Fertigung zur Folge, mit deutlichen wirtschaftlichen Vorteilen.

Der zweite Ansatz kombiniert den organisatorischen Ablauf der Produktentwicklung mit der konstruktiven Struktur der Bauteile bzw. Module des Produktes. Dieser Ansatz koordiniert beteiligte Akteure parallel zu den Entwicklungsschritten bzw. Produktabschnitten. Die Organisation und modulare Aufteilung von Akteuren, die nach diesem Ansatz bei der Produktentwicklung beteiligt sein sollten (Marketing, Konstruktion, Service, Zulieferer, Fertigung u. a.), wird von der Zuordnung „großer“ Produkt(entwicklungs)abschnitte bis hin zu

den „kleinen“ Bauteilen vollzogen. Die Modularisierung ist dabei Bestandteil einer Methode des Komplexitätsmanagements (*METUS*)²⁰⁶, mit deren Hilfe *komplexe Produktkonzeptionen* erfolgreich umgesetzt werden können.

Drittens wurden die Potenziale, die sich aus der modularen Gestaltung für eine kreislauforientierte Produktgestaltung ergeben, in den vergangenen Jahren auch gezielt verfolgt (ERICSSON; ERIXON 1999, S.4-8, SELIGER 2000, S. 381, DREHER;SCHIRRMEISTER 2000, S.136, NIETHAMMER 1997). So beschreibt z. B. Seliger die modulare Gestaltung als die Möglichkeit, Komponenten mit unterschiedlichen Lebenszyklen nutzenoptimal einzusetzen. Dreher; Schirrmeister benennen die Modularisierung als zentrale Gestaltungsregel für Lebensdauererlängerung und Nutzenintensivierung. Niethammer verwendet die Modularisierung als Ansatz zur ökologischen und wirtschaftlichen Gestaltung des Produktrecyclings.

Aufbauend auf diesen Arbeiten wurden im Rahmen des hier dargestellten Teilprojektes die in der Tabelle 24 dargestellten *Regeln der Modularisierung der Produktgestalt* erarbeitet. In ihnen werden die komplexen Anforderungen einer *hochwertigen Kreislaufführung*, zusammengefasst und vereinfacht dargestellt. Diese Regeln können ohne weiteres in den Entwicklungsprozess nach VDI-Richtlinie 2221 integriert werden.

Die Synergien, die sich zwischen den drei dargestellten Ansätzen erschließen lassen, kamen innerhalb der Projektlaufzeit zunehmend zum Tragen. Der bei Konstrukteuren weitgehend bekannte Ansatz der Modularisierung im Zusammenhang mit einer Produktsystematisierung diente anfänglich als Einstieg und Motivation, um über das bekannte strukturierende Prinzip der Modularisierung und die damit verbundenen positiven Effekte (Variantenmanagement, Reduzierung der Bauteilvielfalt und Kosten, Plattformstrategie, Flexibilisierung von Angebot und Fertigung, usw.) neue, erweiterte Ziele diskutieren zu können (Kreislauforientierte Produktkonzeption). So konnte in abteilungsübergreifenden Inhouse Workshops im Partnerunternehmen der Ansatz der Modularisierung der Produktgestalt als allgemein kommunizierbarer Kristallisationskeim für einen Diskurs über Nachhaltiges Wirtschaften erprobt werden. Es ging darum, über Schnittstellen an bestehenden Anwendungen der Modularisierung, Ansätze für die Integration von Anforderungen eines Nachhaltigen Wirtschaftens im Sinne einer kreislauforientierten Produktgestaltung zu erschließen. Die Modularisierung wurde im Folgenden auch für weitere Praxiskontakte als möglicher Ansatzpunkt für einen Unternehmenszugang mit dem Ziel eines Nachhaltigen Wirtschaftens verfolgt.

13.2.6 Praxiszugänge

Im Dialog mit insgesamt fünf Maschinenbau-Unternehmen zeigte sich, dass der konstruktive Ansatz „Modularisierung der Produktgestalt“ sich sehr gut zur Kommunikation der Ziele des nachhaltigkeitsorientierten Wirtschaftens eignet. Mit den Produktentwicklern in den Unternehmen wurden fragebogengestützte Interviews²⁰⁷ durchgeführt. Ziel war es, konkrete Handlungsfelder für nachhaltigkeitsorientierte Ansätze im Unternehmen heraus zu stellen und die Unternehmen für eine weiter gehende Zusammenarbeit zu gewinnen. Es war dadurch möglich, nicht nur über die konkreten Aspekte der Modularisierung zu sprechen, sondern auch die Gedanken der Nachhaltigkeit mit ihren Dimensionen der Langfristorientierung und der intergenerationellen Gerechtigkeit auszutauschen.

²⁰⁶Entwicklung von ID-Consult, München

²⁰⁷Die Fragen behandelten die Betriebsstrukturen, die Organisation der Fertigung, Kunden und Lieferantenbeziehungen, die verfolgte Produktpolitik, Kooperationen mit anderen Anbietern, F+E-Aktivitäten, Redistribution von Produkten, Controlling, bearbeitete Innovationen und Veränderungen, Praxis der Modularisierung.

Zum Einstieg wurde zur Operationalisierung des doch sehr komplexen Leitbildes Nachhaltigen Wirtschaftens, im Bereich der Produktgestaltung eine Einschränkung auf drei noch grobe, und erst im weiteren Prozess zu differenzierende Kriterien vorgenommen:

- Auswahl nachhaltiger Materialien,
- Modernisierbarkeit des Produktes und
- Produkt- und Bauteilrecycling.

Mit diesen Kriterien wurde das Ziel einer Effizienzsteigerung des Material- und Energieeinsatzes durch eine Verlängerung der Produktlebensdauer verfolgt. Im weiteren Verlauf des Projektes war schließlich eine Verständigung möglich auf das Ziel einer *hochwertigen Kreislaufwirtschaft*, im Rahmen einer nachhaltigkeitsorientierten Produktstrategie.

Gemeinsam mit den Unternehmen wurde erörtert inwieweit die oben genannten Anforderungen an Produkte in die bestehenden Abteilungen, Arbeitsbereiche und Entscheidungsprozesse integriert werden können. Dabei mussten verschiedene Ausgangssituationen in den einzelnen Unternehmen berücksichtigt werden.

Die Modularisierung der Produktgestalt zur Reduzierung der Variantenvielfalt und Flexibilisierung der Produktion wurde in Ansätzen schon in allen fünf Unternehmen praktiziert. Eine konsequente Umsetzung in ganzen Produktlinien bzw. Serien war jedoch nur in einem dieser Unternehmen zu beobachten. Mit Produktentwicklern dieses Unternehmens wurden Möglichkeiten zur Erweiterung der konstruktiven Anforderungen an bestehende Module im Sinne der Nachhaltigkeitsorientierung diskutiert. Die im Projektverlauf entwickelten Regeln zur nachhaltigkeitsorientierten Modularisierung bewährten sich dabei als Vermittlungselement zwischen einer allgemeinen leitbildorientierten Vorgehensweise und dem in den Unternehmen jeweils vorzufindenden Entwicklungsalltag.

Aus den vorhandenen Kontakten zu den jeweiligen Unternehmen konnte im Rahmen des Projektes eine Vertrauensgrundlage geschaffen werden, die für neue und komplexere Anforderungen an eine nachhaltigkeitsorientierte Produktgestaltung eine tragende Arbeitsebene ermöglichte. Voraussetzungen dafür sind allerdings ein langer Zeitrahmen, mit (kleinen) nachvollziehbaren Zwischenerfolgen.

13.2.7 Unternehmenszugänge

Unternehmen Jungheinrich

Das Unternehmen produziert, vertreibt und wartet Flurförderfahrzeuge und darüber hinaus gehende Lager- und Materialflusstechnik. Das Hauptwerk befindet sich in Hamburg. Der Konzern vereint vier Marken und ist auf 19 Standorte verteilt. Konzernweit werden 8.500 Mitarbeiter beschäftigt.

Die Jungheinrich AG war Ausgangspunkt für den Projektansatz zur Produktgestaltung mit Fokus auf der Modularisierung als Instrument für die Ziele nachhaltigen Wirtschaftens. Über einen längeren Zeitraum bestand schon vor Projektbeginn Kontakt zu dem sehr engagierten Konzern-Umweltschutzbeauftragten. Er hatte auch schon sehr früh die gesetzlichen Signale im Sinne der Produktverantwortung aufgenommen und auch die Modularisierung als viel versprechenden Strategieansatz verfolgt. Die Geschäftsleitung hatte grundsätzlich „grünes Licht“ für eine Zusammenarbeit gegeben. Die Möglichkeit für eine Zusammenarbeit konzentrierte sich anfänglich noch auf die Aufgabenbereichen des Umweltschutzbeauftragten (Abfallmanagement und Schadstoffproblematik). Ein entsprechendes Teilprojekt konzentrierte sich auf die höherwertige Verwendung von Strahlmittelabfällen als Rohstoff für Bremsbeläge, die bis zum damaligen Zeitpunkt als Sondermüll deponiert werden mussten (vgl. Kapitel 8.2).

Da auch das Unternehmen mit Blick auf seine Produktpalette gerade im längerfristig

orientierten Bereich der Produktentwicklung und des Produkt- und Bauteilrecyclings Gestaltungsmöglichkeiten sah, wurde angestrebt, Bereiche der Produktplanung, der Konstruktion und des Marketing anzusprechen. Die vom Vorstand unterstützte Möglichkeit, das Projekt und sein Nachhaltigkeitskonzept abteilungsübergreifend vorzustellen (anwesend waren Vertreter der Abteilungen Logistik, Materialwirtschaft, Produktentwicklung und Umweltschutz) und die sich daran anschließende Diskussion über konkrete Ansatzpunkte im Unternehmen konzentrierte sich auf folgende drei Themengebiete:

- Simultaneous Engineering,
- modulare Bauweise
- Vergleich zwischen lösemittel- und wasserbasierten Lacken.

Die ersten beiden Bereiche betrafen also direkt den Produktentwicklungsprozess. Beim Thema Simultaneous Engineering war der Blick auf die Zusammenarbeit der beteiligten Akteure am Entwicklungsprozess gerichtet (intern und mit Blick auf die Zulieferer).

In die beiden Bereiche Simultaneous Engineering und modulare Bauweise waren im Prinzip alle der drei oben genannten Kriterien des nachhaltigen Wirtschaftens gut zu verwirklichen. Auf der Grundlage des im Projektteam vorhandenen technischen Know-how einerseits und seiner Tragweite für nachhaltigkeitsorientierte Ansätze andererseits wurde die Modularisierung als weiter zu verfolgender Bereich ausgewählt.

Nach dieser Entscheidung wurde der Kontakt mit der Entwicklungsabteilung ausgebaut. Das Konzept der Modularisierung (verbunden mit einer Plattformstrategie) zur Reduzierung der Variantenvielfalt und Flexibilisierung, wurde bei der Jungheinrich AG schon seit geraumer Zeit auf verschiedene Serien angewendet. Der befragte Mitarbeiter, der als Projektleiter schon die Einführung des Modulkonzeptes für zwei Serien durchgeführt hatte, stand den Fragestellungen aus dem Forschungsprojekt offen gegenüber. Mit ihm wurden die nachhaltigkeitsbezogenen Ziele einer *besseren Instandhaltungsmöglichkeit, einer Modernisierbarkeit des Produktes, des Produkt- und Komponentenrecycling und einer Verlängerung der Lebensdauer* für einzelne Module diskutiert, es wurde aber auch die Überprüfbarkeit (Quantifizierbarkeit) entsprechender Effekte hinterfragt. Im Verlauf der Gespräche zeigte sich, dass trotz eines Bewusstseins für diese Ansätze, die konkrete Integration der Anforderungen in den Entwicklungsprozess noch zu wenig realisiert wird²⁰⁸. In der Diskussion wurden die Grenzen der Entscheidungsmöglichkeiten der Konstruktionsabteilung aufgezeigt und explizit auf die anderen Abteilungen: Vertrieb, Wartung, Marketing und Logistik verwiesen. In diesen Abteilungen, so hieß es, seien die Effekte besser zu quantifizieren als bei der Konstruktion. Ebenso sei dort evtl. leichter eine Integration der doch eher produktstrategischen Ansätze im Sinne der Nachhaltigkeit zu verfolgen.

Unternehmen Greggersen

Das Unternehmen stellt Schweißgeräte und Geräte für den gasmedizinischen Bereich her und bietet umfassenden Service bis zur Systemlösung bzw. Komplettdienstleistung an. Das Unternehmen beschäftigt ca. 170 MitarbeiterInnen und befindet sich seit dritter Generation in Familienbesitz. Für die Zusammenarbeit wurde ein bestehender Kontakt zum „Seniorchef“ aufgenommen. Bei ihm besteht großes Interesse an umweltschutzorientierter Produktionsweise. Auch Nachhaltiges Wirtschaften wird als zu verfolgendes Leitbild geteilt.

Ansätze zur Modularisierung der Produktgestaltung werden bei Greggersen mit dem Ziel einer Flexibilisierung der Produktion auf eine Produktlinie bereits angewendet. Nach der

²⁰⁸Siehe auch entsprechende Umfragen bei Entwicklungsingenieuren, AGIMUS, 2000 [Quelle, WS Recycling gerechte Konstruktion] – Für die Nachgebrauchphase haben noch zahlreiche Produzenten kein Konzept: Maschinenbau 44 %, Fahrzeugbau 30%, Metall 56%. Weiterhin ergibt die Studie, dass bei 84% der Befragten ein diesbezüglicher Handlungswunsch besteht, jedoch nur bei 42% ein tatsächliches Handeln folgt.

Philosophie des Unternehmens wurden die Produkte aber grundsätzlich in klar zu trennende Baugruppen mit ausgeprägten Schnittstellen entwickelt. Die Produkte werden über ein weites Servicenetz betreut und nach der ersten Nutzenphase wieder zurückgenommen, aufgearbeitet und als Ersatzteile in Mietgeräten oder Gebrauchtgeräten eingesetzt. Es findet eine getrennte Sammlung von Kupferlegierungen statt, die an den Primärerzeuger zurückgehen und sortenrein wieder eingeschmolzen werden. Insgesamt werden also schon etliche kreislauforientierte Ansätze verfolgt.

Die systematische Integration einer nachhaltigkeitsorientierten Modularisierung in den Entwicklungsprozess könnte darauf aufbauend eine weitere Stufe bilden. In Kooperation mit einem Entwicklungsingenieur des Unternehmens wurden in mehreren Gesprächen Ansätze für ein hochwertiges Produktrecycling und die dafür notwendige Produktgestaltung ausgelotet. Ein konkretes Projekt kam allerdings leider nicht zustande. Selbst die Option auf eine anteilige finanzielle Unterstützung von Praxisversuchen war für das Unternehmen aufgrund der aktuell extrem dünnen Personaldecke nicht interessant.

Unternehmen Tipper Tie

Das Unternehmen produziert, vertreibt und wartet Clipverschlussgeräte und Clips. Es gehört zu einem amerikanischen Konzern und bedient vorwiegend den europäischen Markt. Das Unternehmen hat 185 MitarbeiterInnen und expandiert derzeit kräftig.

Ein bestehender persönlicher Kontakt zum Unternehmen war Ausgangspunkt für eine Vorstellung der Ansätze Nachhaltigen Wirtschaftens inklusive der konkret mit der Modularisierung verfolgten Ziele in den Bereichen Produkt- und Komponentenrecycling sowie Produktlebenszeitverlängerung. In Zusammenarbeit mit einem Projektleiter der Produktentwicklung wurden mögliche Ansatzpunkte erörtert. Die Planung und Produktion verfolgt bisher eher unsystematisch die Modularisierung der Produktgestalt zur Beherrschung der Variantenvielfalt. Die Produktentwicklung erfolgt als Fortführung des bestehenden Systems. An einer grundsätzlichen Neu-Strukturierung, die ein konsequentes Variantenmanagement ermöglichen würde, besteht aus dem Bereich der Produktentwicklung großes Interesse, sie ist aufgrund der vorhandenen Entscheidungsstrukturen bei Tipper Tie derzeit aber nicht in Sicht.

Die Produkte weisen eine lange Lebenszeit (20-30 Jahre) auf und werden nur in Ausnahmefällen zurückgenommen. Es besteht grundsätzlich keine Abneigung gegen eine nachhaltigkeitsorientierte Ausrichtung, derzeit sind aber andere Fragestellungen dringlicher. Wenn hingegen die Einführung der Modularisierung für ein Variantenmanagement durch nachhaltigkeitsorientierte Ansätze unterstützt werden könnte, bestünde Interesse an einer Integration in den Entwicklungsprozess (Win-Win). Die dafür nötige zeitliche Perspektive wurde jedoch auf mindestens zwei Jahre Entwicklungsarbeit zur Umstrukturierung einer Serie veranschlagt und wurde somit als innerhalb der Projektlaufzeit nicht realisierbar verworfen.

13.2.7.1 Unternehmen Tuchenhagen

Das Unternehmen Tuchenhagen, stellt verfahrenstechnische Anlagen zur Verarbeitung und Lagerung von Flüssigkeiten und Gasen her. Wesentliche Produkte sind u. a. Ventile zur Prozesssteuerung. Das Unternehmen war auch einer der Projektpartner im Teilprojekt zur Einführung der Minimalmengenschmierung. Ausgehend von den modularen und überschaubaren Strukturen eines Ventils wurden im Rahmen dieses Teilprojekts die Regeln zur Modularisierung der Produktgestalt angepasst. Weiterhin wurden die für eine nachhaltigkeitsorientierte Produktentwicklung notwendigen Kriterien und konkreten Anforderungen an die Konstruktion erarbeitet. Es fand somit eine Präzisierung der bis zu diesem Zeitpunkt noch allgemeiner gehaltenen Kriterien statt.

13.2.7.2 Praktische Umsetzung im Unternehmen Tuchenhagen Modularisierung der Produktgestalt – Schritte zu einem Kreislaufkonzept

Der folgende Abschnitt stellt die praktische Anwendung des Modularisierungsprozesses mit seinen Potenzialen für eine hochwertige Kreislaufführung in Teilschritten dar.

Die Regeln zur Modularisierung der Produktgestalt mit dem Ziel einer hochwertigen Kreislaufführung wurden dazu in folgende Abschnitte unterteilt:

- Zerlegung der Gesamtfunktion in Elementarfunktionen– Analyse/Dekomposition,
- Zusammensetzung zu Modulen – (Synthese - Module),
- Zusammensetzung zum Gesamtprodukt – (Synthese – Gesamtprodukt) sowie
- Übergeordnete Aspekte.

Zur besseren Integration der Regeln in den Konstruktionsprozess werden diese dem Vorgehensplan nach der VDI-Richtlinie 2221 zugeordnet. Auf diese Weise werden neben der Modularisierung zur kreislaufgerechten Produktgestaltung vielseitige Leitlinien (Ergonomie, Sicherheit etc.) parallel bearbeitet. Die folgende Abbildung 78 stellt den Entwicklungsprozess mit seiner Abfolge der verschiedenen Arbeitsschritte und der daraus resultierenden Arbeitsergebnisse dar. Nach jedem Arbeitsschritt wird das Ergebnis mit Blick auf die relevanten Leitlinien überprüft, abgestimmt und solange neu bearbeitet, bis das erwünschte Zwischenergebnis vorliegt.

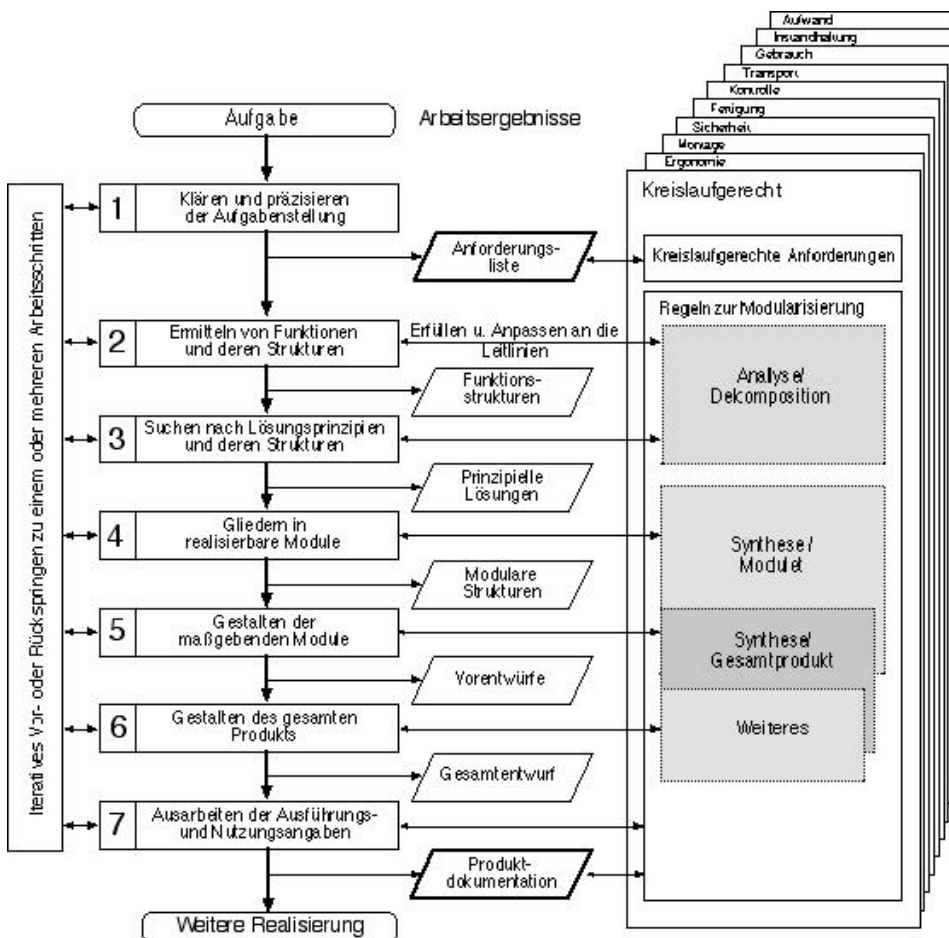


Abbildung 78_ Leitlinie kreislaufgerechte Produktgestaltung (Brahmer-Lohss: 2001)

In Zusammenarbeit mit der Firma Tuchenhagen wurde anhand eines hochwertigen Ventils, die Modularisierung der Produktgestalt mit dem Ziel einer Eignung für hochwertige

Kreislaufführung angewendet. Die Vollständigkeit und Anwendbarkeit der Leitlinien wurde an einem bestehenden Produkt erprobt. Entlang den Abschnitten der Methode und den zugrunde liegenden Regeln wurde eine Strukturierung der wesentlichen Bauteile vorgenommen. Das Ziel war die Erfüllung der in Tabelle 25 aufgestellten Anforderungen.

13.2.7.3 Varivent-Ventil der Fima Tuchenhagen

Der Einsatzbereich des Ventils liegt im Bereich der Bioverfahrenstechnik, z.B. in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie, in der hohe hygienische Anforderungen erfüllt werden müssen. Aus verschiedenen Gasen bzw. Flüssigkeiten werden durch automatisierte Abläufe neue Gemische erstellt. Dafür wird über Ventile, aus einem „Geflecht“ von Rohren, die gewünschte Rohrstrecke zur richtigen Zeit „geschaltet“.

Das Ventil besteht aus drei hochwertigen Stahlsorten, Kunststoffen und elektronischen Bauteilen. Die einzelnen Bauteile besitzen unterschiedliche Lebenszeiten. Eine regelmäßige Wartung ist zur Aufrechterhaltung eines reibungslosen Betriebes notwendig und muss deshalb möglichst leicht durchzuführen sein. Da das Gehäuse bei den meisten Verwendungen eine lange Lebenszeit aufweisen kann (über 15 Jahre) ist die Modernisierbarkeit, z.B. der Steuerung, eine gewünschte Eigenschaft des Produkts, die bei der Konstruktion berücksichtigt werden muss.

Die möglichst vollständige Übertragung der Regeln der Modularisierung der Produktgestalt auf das Varivent-Ventil wurde im Rahmen des Projekts vollzogen und dokumentiert (Brahmer-Lohss, 2001). Die Regeln der Modularisierung wurden in verschiedene Abschnitte eingeteilt. Im Folgenden wird das Vorgehen beispielhaft am zweiten und dritten Abschnitt der Modularisierungsregeln gezeigt.

Der zweite Abschnitt der Modularisierungsregeln wird mit „*Synthese – Module*“ bezeichnet und beinhaltet die Ausgestaltung der einzelnen Bauteile und ihrer Möglichkeiten für eine grundsätzliche räumliche Zuordnung untereinander. Die Regeln lauten:

- Ba) Zusammenfassung der „Elementarteile“ zu (möglichst bekannten) Baugruppen bzw. Modulen, die aufgrund ihrer Funktionserfüllung räumlich zusammen liegen.
- Bb) Zusammenfassung von Modulen aufgrund gleicher Anforderungen an die Kreislaufgerechtigkeit. Diese beiden Schritte sind parallel auszuführen. Es soll versucht werden, durch Priorisierung der Anforderungen kreislaufgerechter Produktgestaltung (neue) räumliche Zuordnungen zu entwickeln. Entscheidend sind die Lebensdauerklassen und die damit verbundenen Wahrscheinlichkeiten von Wartung, Reparatur, Erneuerung, Aufarbeitung und Modernisierung. Eine tabellarische Aufstellung von allen Komponenten (soweit möglich) mit Blick auf die „Bearbeitungs-“Wahrscheinlichkeiten dient dabei als Grundlage. Um kreislaufrelevante „Eingriffe“ am Gesamtprodukt mit möglichst geringem Aufwand durchführen zu können, sind Module entsprechend diesen Wahrscheinlichkeiten einheitlich zusammenzufassen (beispielsweise alle elektronischen Steuerungen in eine Baugruppe – ähnliche Instandsetzung, Aufarbeitung, Modernisierung).
- Bc) Funktionsaufteilung auf mehrere Module soll dabei vermieden werden. Das ist notwendig, um die einzelnen Module unabhängig voneinander montieren, demontieren, prüfen und transportieren zu können.
- Bd) Es sind, so weit wie möglich, Zukaufteile bzw. firmeneigene Bausteine zu verwenden. Auf der einen Seite reduzieren sie die Komplexität des produktspezifischen Konstruktionsprozesses. Auf der anderen Seite erhöhen sie, durch Einsatz und Nutzung für weitere Produkte, die absolute produzierte Stückzahl. Dies ist relevant für die erfolgreiche wirtschaftliche (und technische) Umsetzung von Bearbeitungsprozessen, die dem ersten Lebenszyklus folgen (Aufarbeitung etc.).
- Be) Die modulare Baustruktur innerhalb der Baugruppen und Module setzt die Differentialbauweise und die hierarchische Struktur nicht konsequent fort.

Ziel der Anwendung ist eine weitere Aufgliederung in Untereinheiten mit verschiedenen Lebensdauerklassen, die im Rahmen des Produktlebens getrennt von einander bearbeitet werden sollen. Dies bedeutet innerhalb eines Moduls z.B. verschiedene Austausch- und Modernisierungswahrscheinlichkeiten. Nur wenn diese vorliegen, ist eine konsequente Anwendung sinnvoll.

Ist dies nicht der Fall, ist das Modul entsprechend den Verwertungsanforderungen in Integralbauweise auszuführen und damit leichter zusammenhängend zu demontieren und z. B. stofflich zu verwerten.

Die Regel der räumlichen Zusammenfassung – Funktionserfüllung (*Ba*) wird im Folgenden beispielhaft beschrieben. Mit der Regel wird eine Zusammenfassung der Elementarfunktionen zu (nach Möglichkeit bekannten) Baugruppen bzw. Modulen vorgenommen, die aufgrund ihrer Funktionserfüllung räumlich zusammen liegen. Die in der Funktionsstruktur angedeuteten Querverbindungen werden in dem folgenden Schritt zusammengefügt. Mit Querverbindungen sind die schraffierten Kästchen in Abbildung 79 an den Schnittstellen zwischen den Funktionen gemeint.

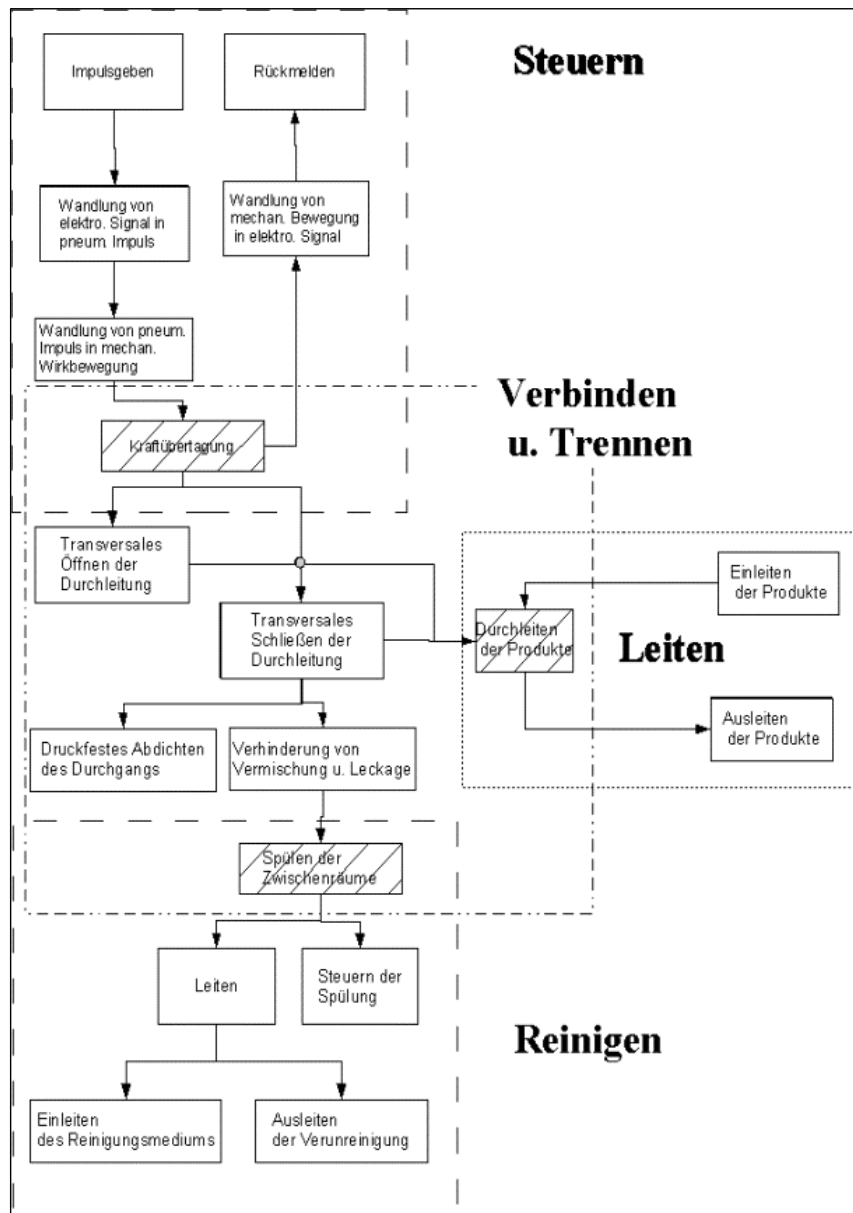


Abbildung 79_Funktionsbaum - Modulbildung

Die Abbildung 79 gibt den funktionalen Zusammenhang der Struktur wieder. Auf ihr aufbauend können unmittelbar Module sowie modulübergreifende Baugruppen zugeordnet werden. Dabei wird vom Konstrukteur, soweit möglich, auf bekannte und vorhandene Bauteile zurückgegriffen.

Im Schritt *(Bb) Zusammenfassung – aufgrund gleicher Anforderungen an die kreislaufgerechte Produktgestaltung* werden wesentliche Merkmale der Kreislauforientierung eingeführt. Den Anforderungen entsprechend sollen die räumlich und funktional zusammenhängenden Einheiten, also die übergeordneten Module (Verbinden/Trennen, Reinigen, Steuern, Leiten, visuelle Kontrolle), zusammenhängend gewartet, repariert, aufgearbeitet und modernisiert werden. Dazu sind die betroffenen Komponenten/Bauteile auszutauschen. Für eine Wartung, Reparatur, Aufarbeitung und Modernisierung der *einzelnen Bauteile* (Dichtungen, elektronische Schalter, metallische Werkstücke wie Ventilteller) sind die Stückzahlen der anfallenden Teile für eine wirtschaftliche Weiterbearbeitung entscheidend. Die Komponenten sind entsprechend den jeweils technisch und wirtschaftlich zu realisierenden (Wieder- und Weiter-) Verwendungsverfahren zu priorisieren. Der Konstrukteur muss zur Beurteilung und Auswahl der Verfahrensalternativen weitreichende Informationen einholen. So sind neben der hausinternen Fertigung und dem Marketing, externe Aufarbeiter und Verwerter mit einzubeziehen. Sind keine hochwertigen Verfahrensmöglichkeiten, bzw. ausschließlich die Möglichkeit zur Beseitigung, vorhanden, sind andere Komponenten zur Realisierung der Bauteile auszuwählen.

Den Bauteilen werden als zusammengefassten Einheiten Bearbeitungs-Wahrscheinlichkeiten zugewiesen. Die folgende Tabelle 37 gibt eine Übersicht nach Wartungs-, Reparatur-, Erneuerungs-, Aufarbeitungs- und Modernisierungswahrscheinlichkeit.

Tabelle 37 Bearbeitungswahrscheinlichkeiten von Modulen im Varivent - Ventil

Wahrscheinlichkeit zur ²⁰⁹ Funktion	Komponente	Wartung 1), 2)	Reparatur 3)	Erneuerung 4)	Aufarbeitung 5)	Modernisierung 5)
Gesamtes Modul „Verbinden/Trennen“		Normal nur Dichtungen	möglich	Normal nur Dichtungen	Nach 1./2. Lebenszyklus sinnvoll/ möglich	Jederzeit möglich, sollte mit Wartung gekoppelt werden
Kraftübertragung	Kolben u. Ventilstange	wartungsfrei	unwahrscheinlich	20 Jahre	<input type="checkbox"/>	mittel
Transversales Öffnen Transversales Schließen	Teller und Sitz 6)	wartungsfrei	unwahrscheinlich	20 Jahre	<input type="checkbox"/>	mittel
Abdichten der Gehäuse	Dichtungen	3 Monate – 4 Jahre	unwahrscheinlich	3 Monate – 4 Jahre	<input type="checkbox"/>	hoch
Vermischung/Leckage- Verhinderung	Dichtungen, Ableitung der Leckage	eingriffsfrei über CIP	unwahrscheinlich	20 Jahre (ohne Dichtungen)	<input type="checkbox"/>	mittel
Gesamtes Modul Reinigen		Nur Dichtungen	möglich	5)	<input type="checkbox"/>	n.o.
Einleiten des Reinigungsmediums	offen (o.)	wartungsfrei	unwahrscheinlich	20 Jahre	<input type="checkbox"/>	n.o.

²⁰⁹ Abkürzungen und Anmerkungen:

s.o. -siehe oben

o. - offen - an dieser Stelle noch keine Angabe möglich

1. Dies gilt für die Verwendung unter normalen Umständen (99 %). Allgemein sind für die Wartung aller Medien berührenden Teile (Dichtungen, Leitungen, Teller, Sitz, Tellerstange) die Temperatur (20°C - 140°C) und die physikalisch-chemischen Eigenschaften (alkalisch, sauer, allg. korrosiv, u.a.) der Medien von entscheidender Bedeutung. Bei der Durchleitung von chemisch aggressiven Stoffen und/ oder bei zu hohen Temperaturen können alle mit den Stoffen in Berührung kommenden Materialien angegriffen werden (z.B. Lochfraß der Metallwerkstücke durch aktiv-chlorhaltiges Wasser, Zersetzen der Dichtungen (Elastomere) bei der Durchleitung von bestimmten Buttersäuregemischen oder zu hohen Temperaturen etc.).
2. Wesentliche Grundlage der Wartungsfreiheit der Medien berührenden Komponenten liegt in der 'Cleaning In Place' -Funktion (CIP), der Reinigung am Ort der Vermischung oder Leckageentstehung selbst. Dies soll automatisierbar sein. Diese Funktion ist so wesentlich, dass sie zu den Hauptfunktionen zählt (siehe Funktionsstruktur).
3. Grund für eine Reparatur vor dem Ende eines Lebenszyklus ist die Verwendung stark korrosiver Medien mit hohen Temperaturen (wie unter 1.) und ungewollte äußere mechanische Einwirkungen (herunterfallender Hammer o.ä.)
4. Wird von Wartung und Reparatur abgedeckt
5. Aufarbeiten und Modernisieren soll durch Säuberung und Austausch nur der defekten, verschlissenen oder technologisch veralteten Bauteilen geschehen. Alle anderen Bauteile einer Baugruppe bzw. eines Moduls sollen wiederverwendet werden. Dabei ist sowohl eine Wiederverwendung des kompletten Moduls als auch ein Remanufacturing möglich. Eine formverändernde Bearbeitung mit anschließender Oberflächenbehandlung soll nicht vorgenommen werden.
6. Die Funktionen Öffnen und Schließen sind in den Komponenten Teller und Sitz zusammengefasst.
7. Die Steuerung der Reinigung wird in diesem Schritt nicht weiter differenziert. Es ist nahe liegend, dass Signal-Wandlungsschritte elektronische Bauteile benötigen, die in etwa denen der Steuerung der Medienströme entsprechen. Es ist daher sinnvoll, sie räumlich zusammenzulegen.

Ausleiten von Verunreinigung	o.	wartungsfrei	unwahrscheinlich	20 Jahre	<input type="checkbox"/>	n.o.
Steuern der Reinigung	7)	7)	7)	7)	7)	7)
Gesamtes Modul Steuern der Produktströme		wartungsfrei	möglich		Nach 1./2. ... Lebenszyklus sinnvoll/ möglich	hoch
Wdlg e <input type="checkbox"/> p Impuls	Pilotventil	wartungsfrei	unwahrscheinlich	5 x 10 ⁶ - Schaltgänge	<input type="checkbox"/>	unwahrscheinlich
Wdlg p <input type="checkbox"/> m Wirkbewegung	Antrieb	wartungsfrei	unwahrscheinlich	10 ⁶ - Schaltspiele	<input type="checkbox"/>	unwahrscheinlich
Kraftübertragung	Kolben u. Ventil-stange	wartungsfrei	unwahrscheinlich	20 Jahre	<input type="checkbox"/>	mittel
Wdlg m <input type="checkbox"/> e Signal	Mikroschalter	wartungsfrei	unwahrscheinlich		<input type="checkbox"/>	
Gesamtes Modul Leiten		wartungsfrei	möglich	5)	<input type="checkbox"/>	unwahrscheinlich
Einleiten	Gehäuse	wartungsfrei	unwahrscheinlich	5)	<input type="checkbox"/>	unwahrscheinlich
Durchleiten	Gehäuse	wartungsfrei	unwahrscheinlich	5)	<input type="checkbox"/>	unwahrscheinlich
Ausleiten	Gehäuse	wartungsfrei	unwahrscheinlich	5)	<input type="checkbox"/>	unwahrscheinlich
Gesamtes Modul Visuelle Leckageerkennung	Laterne	wartungsfrei	unwahrscheinlich	5)	<input type="checkbox"/>	unwahrscheinlich

Aus dem Geschilderten und aus der Tabelle ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

1. Die elektronischen Bauteile (Steuerung der Medienströme und Reinigung) benötigen keine Wartung und werden bei Ausfall nach Bedarf ersetzt. Sie besitzen ähnliche Funktionsarten (Signal- und Impulswandlung) und damit verbundene Anschlussnotwendigkeiten (e-Kabel, Druckluftschlauch). Modernisierungen werden für den Bereich dieser elektronischen Bauteile als hoch und gleich wahrscheinlich angesehen. Auf der Grundlage dieser drei Aspekte können sie als Modul ausgeführt werden. Dieses Modul wird im Folgenden als Steuereinheit bezeichnet.
2. Die Dichtungen, die mit den Medien in Kontakt kommen, müssen in regelmäßigen Abständen in Abhängigkeit von der Anwendung (Medien und Temperatur) gewartet werden. Sie sind deshalb in einer logischen Abfolge anzuordnen, die eine möglichst zügige Wartung bzw. einen möglichst einfachen Austausch zulässt. Sie sitzen zwischen allen starren Verbindungen oder werden zur Abdichtung beweglicher Teile gegen das Medien führende Gehäuse verwendet.
3. Die mit den Medienströmen in Kontakt kommenden Komponenten (Gehäuse, Teller, Sitz u.a.) sind bis auf die Dichtungen aus einheitlichem Material herzustellen. Dies ist sinnvoll, da sie in gleicher Weise belastet werden. Sie sollten aus besonders korrosionsbeständigem V4A-Stahl (1.4404) hergestellt werden (Langlebigkeit).
4. Für alle *nicht* mit den Medienströmen in Kontakt kommenden Komponenten reicht es erfahrungsgemäß aus, V2A-Stahl (1.4301) zu verwenden.

Zusammenfassend können vier Gruppen gebildet werden, denen ähnliche „Bearbeitungs-“ Wahrscheinlichkeiten für alle 4 Kategorien zukommen (Wartung, Reparatur, Aufarbeitung, Modernisierung).

- Elektronische Bauteile (Initiator / Mikroschalter), Pilotventil, mögliche elektronische Reinigungssteuerungselemente)
- Zu wartende Dichtungen (Leitungsichtungen, Dichtungen des Trennmechanismus, Kolbenstangendichtung)
- Medien berührende Teile (Gehäuse, Stange zum Teller, Teller, Sitz, Dichtungen)
- Nicht Medien berührende Teile (Kolbenstange, Antrieb, u.a.)

Über die hier vorgestellte Zusammenstellung hinaus sind weiterführend Kreislaufkonzepte zu prüfen. So können auf der Grundlage der zusammengestellten Gruppen Lebenszyklusszenarien abgeschätzt werden. Das beinhaltet die technische Realisierbarkeit von Wartung, Reparatur, Aufarbeitung und Modernisierung, die Abschätzung der zu erwartenden (Rücklauf-)Mengen für die jeweiligen Arbeitsschritte sowie die logistischen und finanziellen Rahmenbedingungen.

Ein weiterer wesentlicher Schritt für eine kreislauforientierte Produktgestaltung ist die Ausgestaltung der Schnittstellen der Bauteile zueinander, die mit dem Abschnitt ‚Synthese – Gesamtprodukt‘ durchgeführt werden kann. Durch die Regel *(Ca) Strukturierung entlang Hauptverbindungsrichtung nach Baumstruktur, genaue Schnittstellengestaltung* findet eine Ausdifferenzierung statt.

Die Module Steuern, Antrieb und Gehäuse werden um eine gemeinsame Achse als Hauptverbindungsrichtung in hierarchischer Anordnung aneinander gereiht. Die Achse besteht aus Schaltstange, Kolbenstange, Ventilstange und Leckagerohr, welche durch einfach zu lösende Verbindungen miteinander verbunden sind. Entsprechend dieser Achsenanordnung sind auch die Module angeordnet²¹⁰: Steuerung, Antrieb und Gehäusekombination (Zusammenfassung von zwei Gehäusen mit einer Durchtrittsöffnung und dem Einsatz von Ventilstange und Ventilteller). Zwischen Antrieb und Gehäusekombination befindet sich ein Bauteil, das bis zu diesem Schritt noch nicht beschrieben wurde. Es dient der visuellen Kontrolle und wird als „Laterne“ bezeichnet (Abbildung 80, Bauteil Nr. 7).

²¹⁰ Durch diese Anordnung sind die Module nicht von einem zentralen Stamm seitlich zu trennen, sondern eher wie bei einem Schachtelhalm, dessen Stamm auseinander gezogen werden kann.

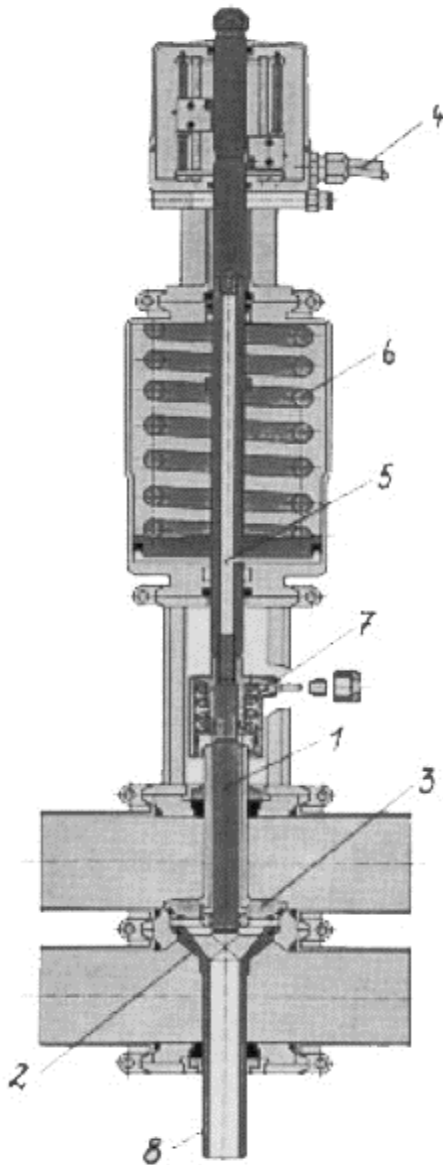


Abbildung 80_Ventil (Mieth 1989)

Die Module Steuerung, Antrieb, Laterne und Gehäusekombination mit Ventiltellereinsatz sind durch jeweils gleiche Verbindungselemente, einen Klappring mit zwei Schrauben und zwei Muttern verbunden.

In Regel Bb sind als einzige regelmäßig auszutauschende Bauteile die Dichtungen herausgestellt worden. Da sie sich in verschiedenen Modulen befinden, ist ihre Anordnung in einer logischen, leicht nachzuvollziehenden Abfolge zu gestalten. Die auszutauschenden Dichtungen sind als kleine schwarze Punkte auf der Darstellung zu sehen. Abhängig von einer dynamisch oder statischen Beanspruchung und den zu leitenden Medien, sind die Austauschintervalle anzusetzen. Die „Schachtelalmstruktur“ ermöglicht eine einfache Demontage, ohne die Verbindungen zum Leitungssystem trennen zu müssen, eine zügige Wartung und den einfachen Austausch aller relevanten Dichtungen.

Für die Reparatur, Modernisierung oder Aufbereitung und letztendlich auch für das stofflichen Recycling sind die Module mit einfachen Handgriffen zu trennen und verschiedenen Prozessen zuzuordnen. Die Struktur erfüllt damit also eine wesentliche Grundforderung der kreislaufgerechten Gestaltung.

Zur Veranschaulichung, wie durch Variation einer Schnittstelle die Erfüllung kreislaufgerechter Anforderungen gesteigert werden kann, wird im Folgenden die Schnittstelle zwischen den beiden Gehäusen zwischen den zwei waagerechten Rohren unten auf der Abbildung betrachtet. Um die obige Abbildung des gesamten Ventils besser zu verstehen, wird einleitend der Hintergrund für die Existenz und Funktion der beiden Ventilteller beschrieben.

Zur Erfüllung der Anforderung der Leckageerkennung bei Undichtheit der Trennstelle, ist das dargestellte Ventil mit einem unteren und mit einem oberen Ventilteller ausgestattet. Tritt durch eine der Dichtungen zwischen Gehäuse und beweglichen Bauteilen Flüssigkeit oder Gas hindurch, gelangt es über einen Zwischenraum in das Leckagerohr und wird ausgeleitet. Das hat zwei Effekte. Zum einen findet kein ungewollter Medienübertritt statt. Darüber hinaus wird durch den Auslauf aus dem Leckagerohr die Leckage sichtbar und eine Instandsetzung kann erfolgen. Die Hauptanforderung ist jedoch zum anderen das Trennen und Verbinden von Medienströmen.

Betrachtet man die Schnittstelle genauer, so ist zu erkennen, dass der Sitz, gegen den die Ventilteller schließen, ein gesondertes Bauteil ist, das nicht mit dem Gehäuse verschweißt oder verschraubt ist. Anhand von zwei anderen Gestaltungsmöglichkeiten (Variante 1-2) der gleichen Schnittstelle wird die Spannweite der Gestaltung dargelegt und die jeweiligen Vorteile der Varianten beschrieben.

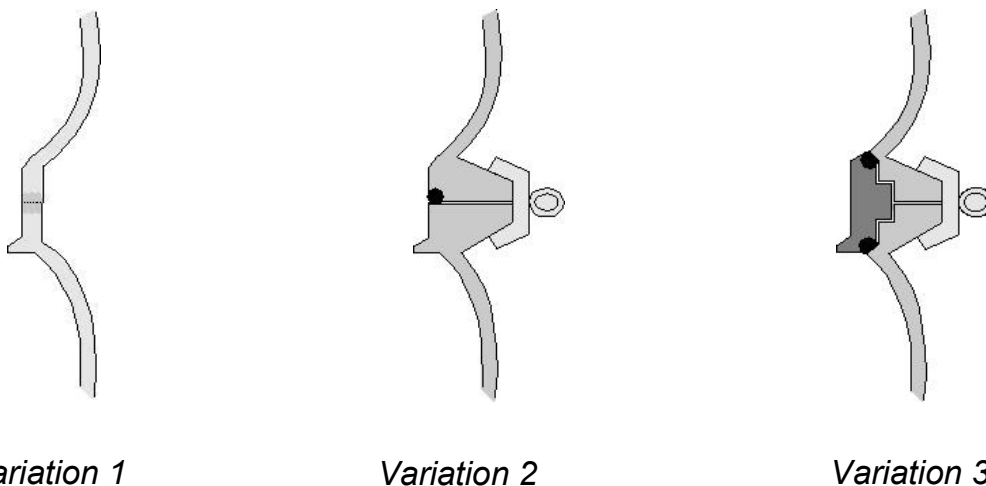


Abbildung 81_Variation der Schnittstellen zwischen den beiden Gehäusen

In der Abbildung 81 stellen die Halbbögen jeweils das obere bzw. untere Gehäuse und schwarze Punkte die Dichtungen dar. Der Rest wird jeweils beschrieben

Variante 1: Die beiden Gehäuse sind zusammengeschweißt. Das vorstehende Profil als Sitz für den unteren Ventilteller ist als Formteil in das Gehäuse integriert. Die Vorteile sind:

- Es gibt keine statischen Dichtungen, die ausgewechselt werden müssen
- weniger Bauteile, schnellere Demontage für stoffliches Recycling
- einfachere Konstruktion, geringerer Fertigungsaufwand

Variante 2: Die beiden Gehäuse sind nicht verschweißt, sondern werden von einem Klappring zusammengehalten. Eine Dichtung zwischen den beiden Gehäusen unterbindet das Durchtreten von Medien. Die beiden Gehäuse sind unterschiedlich geformt. Die Vorteile dieser Variation sind:

- Bei sich verändernden Anforderungen an das Ventil kann das untere Gehäuse gegen ein anderes ausgetauscht werden. Grund dafür kann der Einsatz des Ventils für andere

Schaltanforderungen sein, mit einer anderen Ventiltellerkombination, welche einen anderen Sitz benötigt. Dies ist mit einer Modernisierungsoption gleich zu setzen. Die Produktnutzenphase könnte dadurch verlängert werden.

- Durch die Spannverbindung können sich die beiden Gehäuse geringfügig gegen einander verdrehen. Das verhindert bei starker Scherbeanspruchung die Entstehung von Rissen und Bruchstellen. Diese können entstehen, wenn unterschiedlich temperierte Medien (z.B. 20°C und 80°C) durch die Leitungen strömen. Treten diese Anforderungen auf, hat diese Bauweise eine erheblich höhere Lebenserwartung.(Lebenszeitoptimierung durch höherwertige Konstruktion).

Variante 3: Zusätzlich zur zweiten Variante ist die Schnittstelle um einen zu trennenden Sitz in Ringform erweitert. Dieses Formteil zentriert die beiden Gehäuse. Der Sitzring wird durch zwei Dichtungen gegen die Gehäuse abgedichtet. Dies bedeutet eine konsequente Aufteilung der beiden Funktionen 'Leiten der Medien' (Gehäuse) und 'Trennen und Verbinden' (Ventilteller und Sitz) auf verschiedene Baugruppen. Vorteile dieser Variante sind:

- Das obere und untere Gehäuse hat die gleiche Bauform. Das bedeutet, betrachtet man allein die Herstellung eines Ventiltyps, eine Verdopplung der Stückzahlen eines Bauteils mit wesentlichen Vorteilen für Aufarbeitung und Modernisierung: Die Wirtschaftlichkeit aller Produkt bearbeitenden Prozesse steigt mit der Anzahl der Stückzahlen (natürlich auch im Besonderen für die Fertigung). Bezieht man jetzt noch andere Ventiltypen, die eine andere Sitzgestaltung benötigen, mit ein, so vervielfachen sich die Stückzahlen. Eine Konstruktion mit jeweils gleicher Bauform für das obere Gehäuse und Variation des unteren Gehäuses benötigt für beispielsweise fünf verschiedene Typen sechs verschiedene Gehäusebauformen. Bei gleicher Bauweise, wie bei dieser Variante, reduziert sich die Variantenvielfalt auf eins und versechsfacht sich die Stückzahl, bezogen auf die zu variierende Gehäuseform.
- Die Gehäuse können bei Umbau, Erweiterung und Modernisierung einer Anlage durch die einheitliche Bauform beliebig miteinander kombiniert werden. Die gleichen Öffnungen auf beiden Seiten ermöglichen z.B. die Erweiterung zu drei übereinander sitzenden Gehäuse, bzw. eine Schaltung von drei verschiedenen Leitungen. Die Komponenten sind durch ihre Variabilität zukunftssicherer.
- Bei einem Ventiltyp mit nach unten öffnendem Teller können durch Lösen des Sitzes, Ventilteller und -stange zur Wartung mit geringem Aufwand nach oben entfernt werden. Durch eine erleichterte Wartbarkeit des Produktes kann dessen technische Lebenszeit verlängert werden.

13.2.8 Bewertung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes ist durch Zusammenstellung und Anwendung der Modularisierungsregeln ein Weg aufgezeigt worden, wie Anforderungen an eine kreislaufgerechte Produktgestaltung in den Konstruktionsprozess integriert werden können. Zum einen dienen die hierzu formulierten Regeln der Vermittlung von Anforderung an eine kreislaufgerechte Produktgestaltung. Darüber hinaus stellte ihre beispielhafte Anwendung die Einsetzbarkeit der Regeln plastisch dar. Die Darstellung ist dafür bewusst einfach gehalten. Die Orientierung auf einen Satz einfacher Regeln nach dem Vorbild der VDI-Richtlinie 2221 erschien sinnvoll, da aus Gesprächen mit Konstrukteuren hervorging, dass sie gerade im Zusammenhang mit Anforderungen an eine kreislaufgerechte Produktgestaltung erweiterte Instrumente an die Hand bekommen wollen, mit denen sie die komplexer werdenden Anforderungen an den Konstruktionsprozess darstellen und bewältigen können. Die Regeln der Modularisierung der Produktgestalt sind somit als ein Baustein zu betrachten für die Orientierung in Richtung auf eine kreislaufgerechte Produktgestaltung. Alle relevanten Kriterien werden in ihrem Zusammenhang dargestellt. Die weiterführende konkrete Implementierung in den Konstruktionsprozess muss dabei immer auf der Grundlage der Konstruktionsumgebung, des vorhandenen Know-hows und der Möglichkeiten der jeweiligen Produktstrategie entwickelt werden. Als nächster Schritt wäre denkbar, eine sowohl qualitative wie quantitative Bewertung der Effekte einer

Kreislaufwirtschaft auf hohem Niveau im Zusammenhang mit der Anwendung der Regeln im Unternehmen Tuchenhagen durchzuführen. Interesse zur Weiterführung der Zusammenarbeit besteht auf beiden Seiten.

13.3 Energiebilanz Flottenmanagement – ein Beispiel aus dem Bereich Produktnutzung:

In produzierenden Unternehmen sind innerbetrieblich zahlreiche verschiedene Transport- und Lagervorgänge zu bewältigen. Rohstoffe müssen gelagert und zum richtigen Zeitpunkt in die Produktionslinie eingespeist werden. Hilfs- und Betriebsmittel müssen transportiert werden. Halbzeuge werden zwischengelagert u. s. w. u. s. f. Die innerbetriebliche Logistik kann somit als ein zentrales System betrachtet werden, das für eine effiziente Produktion reibungslos funktionieren muss. Eine Optimierung dieses Systems ist für den Betrieb von großer Bedeutung und gleichzeitig mit hohen Risiken verbunden. Gerade in diesem Bereich sind hohe Kosteneinsparungen zu erzielen, Wenn z. B. die innerbetriebliche Logistik nicht zentral, systematisch und effizient gemanaged wird, besteht die Gefahr, dass einzelne Abteilungen unnötige Redundanzen aufbauen (zu viele Reservegeräte) und Leerfahrten werden kaum abteilungsübergreifend optimiert.

Wir sind daher der Frage nachgegangen, ob eine Optimierung des Flottenmanagements zusätzliche ökologische und ökonomische Vorteile eröffnen kann, und ob sich dabei Unterschiede ergeben zwischen einem externen und einem internen Flottenmanagement. Dies wurde im Kontext der öko-effizienten Dienstleistungen behandelt, da ein externes Flottenmanagement als ein gutes Beispiel für eine produktbegleitende Dienstleistung betrachtet werden kann. Da zur Bewertung der Effekte auf Grund der begrenzten zeitlichen Ressourcen und der Datenlage keine vollständige Ökobilanz durchgeführt werden konnte, haben wir uns auf eine Analyse de kumulierten Energieaufwands beschränkt. Ein besonderes Augenmerk lag also auf der Identifikation von Energieeinsparpotenzialen und auf den Möglichkeiten zu ihrer Umsetzung.

Der Begriff *Flottenmanagement* bezeichnet die Fuhrparkverwaltung für einen Kunden. Die Fahrzeuge bleiben im Eigentum des Anbieters (Flottenmanager). Dieser ist für das reibungslose Funktionieren der Fahrzeuge zuständig (Full-Service). Der Kunde ist Betreiber (Nutzer) der Fahrzeuge und leistet monatliche Zahlungen an den Anbieter, die sich aus den Leasingraten für die Fahrzeuge (Finanzierungsanteil) sowie einer Full-Service-Pauschale zusammensetzen (Service-Leasingvertrag). Beim Flottenmanagement handelt es sich somit um ein Outsourcing von Teilen der Fahrzeugverwaltung.

Das *Logistikmanagement* geht über das Flottenmanagement hinaus und bezeichnet die Übernahme von Transportaufgaben für einen Kunden. Dazu gehört die Auswahl der geeigneten Abläufe (Wege) und Mittel (z.B. Fuhrpark, Fahrer, Stetigförderer) sowie deren Umsetzung. Der Kunde gibt lediglich die Zielvorgaben vor. Hier handelt es sich um ein Outsourcing der Logistikaufgaben.

Wie zu Beginn dieses Kapitels schon erwähnt, werden ökologisch relevante Einsparpotentiale durch die produktbegleitende Dienstleistung „Flottenmanagement“ vermutet, weil die Anbieter von Transportleistungen nicht am Absatz möglichst vieler Fahrzeuge verdienen, sondern an dem angebotenen Service-Leasingvertrag. Die vom Flottenmanager verwendeten Fahrzeuge werden daher - so eine weit verbreitete These, die wir überprüfen wollten - nach Robustheit, Funktionalität, Modernisierbarkeit (= Langlebigkeit) und Sparsamkeit im Betrieb ausgewählt und durch optimale Wartung und Einsatz lange in der Nutzungsphase gehalten. Wird das Flottenmanagement durch den Fahrzeughersteller angeboten, können die Fahrzeuge durch direkte Rückkopplungen der Flottenmanager zu den Konstrukteuren weiter für ihren Einsatz optimiert werden (Funktionalität, Robustheit). Durch den professionellen Betrieb des Fuhrparks können weitere Vorteile erschlossen werden (z.B. Wegstreckenoptimierungen). Auch größere Investitionen, die die Kapazität von einzelnen Kunden überschreiten, können für professionelle Flottenmanager wirtschaftlich

umsetzbar sein (z.B. Stetigförderer (=fahrerlose Transporte)). Darüber hinaus lassen sich Rückführungskonzepte leichter realisieren, wenn das Produkt im Eigentum des Herstellers bleibt (Fishbein et al. 2000, Stahel 1999).

13.3.1 Beschreibung des Flottenmanagements eines Flurförderzeugherstellers

Für die Untersuchung stützen wir uns auf Daten, die uns von einem Partnerunternehmen zur Verfügung gestellt wurden, das sowohl Hersteller und Verkäufer von Flurförderzeugen als auch Anbieter umfassender produktbegleitender Dienstleistungen ist. Die Untersuchung wurde vor dem Hintergrund der im Folgenden kurz skizzierten Ausgangslagen durchgeführt:

- Finanzierungsdienstleistungen (Leasing- und Rental- und Mietkauf-Verträge über Fahrzeuge) werden über eine 100% ige Tochter abgewickelt.
- Das Unternehmen selbst bietet neben Reparatur und Wartung von Fahrzeugen auch Full-Service-Verträge unterschiedlichen Umfangs an. Neben Intervall-Service (Instandhaltung), Sicherheits-Service (Terminüberwachung und Durchführung von Sicherheitsüberprüfungen gemäß UVV 48), Reparatur-Service, Ersatzteil-Service und Umwelt-Service (Entsorgung von Hydraulikölen und anfallenden Altteilen) können optional Reifen- und Bandagen-Service (Wechseln von Reifen bzw. Bandagen nach Intervallen) und Stand-by-Fahrzeug-Service (Ersatzfahrzeugstellung) vom Kunden in Anspruch genommen werden.
- Das Unternehmen führt Fahrerschulungen für Flurförderzeuge durch. Der erfolgreiche Abschluss dieser Schulungen führt zur Verleihung einer Fahrerlaubnis.
- Im Aufbau befindet sich die Dienstleistung einer Flottenmaterialflussanalyse. Diese Analyse ermittelt das Einsparpotential des Fuhrparks durch Optimierung der Transportaufgaben (Vermeidung von Leerfahrten, Strecken- und Transportoptimierungen) und den Einsatz der geeignetsten Fahrzeuge. Für die Optimierung sich verändernder, variabler Transportaufgaben kann ein Transportleitstand eingerichtet werden. Dort werden alle anstehenden Transportaufgaben zusammengeführt und für die einzelnen Fahrzeuge optimierte Routen ermittelt. Ziel der Wegstreckenoptimierung ist in erster Linie die Reduzierung der Kosten²¹¹ insbesondere der Kosten verursachenden Fahrerfahrzeuge. In der Regel resultiert aus derartigen Analysen ein Verringerungspotenzial der zurückgelegten Strecken in Höhe von 15-25%²¹² und einen Vorschlag zur Verkleinerung der Fahrzeugflotte. Inwieweit die ermittelten Potenziale umgesetzt werden, hängt allerdings stark von der Bereitschaft des Kunden ab. Bei über die Zeit gewachsenen Strukturen, sind dafür u.U. erhebliche Ablaufänderungen notwendig, die auch intern umgesetzt werden müssen.

Die aufgeführten Dienstleistungen können weitgehend unabhängig voneinander vom Kunden in Anspruch genommen werden. So ist es üblich, dass Käufer die Fahrzeuge durch das Unternehmen auch warten lassen oder Full-Service-Verträge abschließen. Leasing-Verträge schließen in der Regel die Wartung durch das Unternehmen ein, weil das Unternehmen dann einen bestimmten Restwert des Fahrzeugs nach Ablauf der Laufzeit garantiert. Rental-

²¹¹Die Kosten des Betriebs von Flurförderzeugen setzen sich aus Anschaffungskosten, Personalkosten, Servicekosten und Energiekosten zusammen. Nach Kulick 1999 betragen die Kosten des Fahrers zwischen 70 und 80% der Betriebskosten pro Stunde. Rödiger 1997 nennt dagegen Kosten von 50-75% für den Fahrer abhängig von der Nennlast der Fahrzeuge.

²¹²Eine Leerfahrtenoptimierung bringt theoretisch bis zu 50% Einsparung, wenn vorher alle Rückwege ohne Ladung gefahren wurden. Die *mittlere* Größe von Wegstreckenoptimierungen wird vom Anbieter auf 15-25% Einsparung geschätzt. Das Unternehmen teilt Interessenten mit, dass eine Optimierung bei 20% liegen könnte. Auch 25% können bei Einsatz von IT (Transportleitstand) erreicht werden. Viel größere Einsparungen werden nicht erreicht, da auch der Kunde i.d.R. schon bisher versucht hat, seine Logistik zu optimieren.

Verträge können dagegen mit oder ohne Full-Service abgeschlossen werden (d.h. reine Finanzierungsform).

Auch Flottenmaterialflussanalysen werden sowohl für Kunden, die einen eigenen Fuhrpark haben, wie auch für Kunden, die ihre Fahrzeuge im Rental betreiben, durchgeführt. Materialflussanalysen wurden bisher nur auf Anfrage der Kunden durchgeführt. Das Unternehmen führt diese gegen Kostenerstattung durch (nicht gewinnbringend). Wird in der Folge ein Rental-Vertrag geschlossen oder werden Fahrzeuge gekauft, wird diese Aufwandsentschädigung teilweise oder ganz verrechnet (abhängig vom Auftragsvolumen). Werden Materialflussanalysen für bestehende Flotten durchgeführt (Regelfall), in denen einzelne Fahrzeuge noch verwendbar sind, werden statt Rental-Verträgen genau genommen Sale-and-lease-back-Verträge geschlossen. Das Unternehmen kauft in diesem Fall die gesamte Flotte auf. Die nicht mehr verwendbaren Fahrzeuge werden verschrottet oder second-hand weiterverkauft. Die weiter verwendbaren werden dem Kunden wieder zu günstigen Konditionen vermietet.

Unserer Vorstellung von Flottenmanagement entsprach am ehesten ein Rental-Vertrag mit Full-Service. Hierbei bleibt das Eigentum der Fahrzeuge beim Unternehmen. Neben einer Leasingrate für die Fahrzeuge zahlt der Kunde einen monatlichen Pauschalbetrag an das Unternehmen für Wartung, Instandhaltung, Sicherheitschecks und Ersatzfahrzeugstellung (Full-Service). Damit hat der Kunde Anspruch auf die Fahrzeugleistung, d.h. auf bestimmte Fahrzeugtypen, aber nicht auf ein Modell mit bestimmter Seriennummer. Fällt ein Fahrzeug aus, stellt das Unternehmen den Ersatz. Die laufenden Kosten werden von der Monatspauschale abgedeckt.

Rental-Verträge mit Full-Service werden (wegen der Leistungsgarantie durch das Unternehmen) typischerweise für schwere Einsätze der Fahrzeuge abgeschlossen. Für normale Einsätze sind dagegen Leasing-Verträge mit Abrechnung von Wartung und Instandhaltung nach Aufwand für den Kunden günstiger. Da das Eigentum der Fahrzeuge bei beiden Vertragsformen bei dem Unternehmen bleibt, können die monatlichen Raten in voller Höhe als Betriebsausgaben geltend gemacht werden. Wenn beim Kunden keine Werkstatt vorhanden ist, kann dies ein weiterer Grund sein, einen Rental-Vertrag abzuschließen.

Das Unternehmen versucht, die Rental-Zahlungen des Kunden inklusive Full-Service auf konstantem Niveau zu halten. Daher liegt die Nutzungszeit der Fahrzeuge beim Kunden bei Rental-Verträgen bei 3-5 Jahren. Bei längeren Nutzungsdauern ist der Betrieb der Fahrzeuge im Full-Service für das Unternehmen nicht mehr wirtschaftlich, da die Wartungskosten dann zu groß werden. In den ersten 5 Jahren der Fahrzeugnutzung betragen die Wartungskosten ca. 10% des Anschaffungswertes der Fahrzeuge (Rödig 1997). Danach steigen die Reparaturkosten überproportional an. Nach Ablauf der Rental-Verträge werden ca. 30% der Fahrzeuge von den Kunden übernommen. 70% der Fahrzeuge werden ausgemustert, vom Unternehmen generalüberholt und second-hand weiterverkauft. Der Anteil der verschrotteten Fahrzeuge ist unbekannt. Durch die betriebliche Aufarbeitung werden für die Second-hand-Fahrzeuge noch relativ gute Verkaufspreise erzielt. Die Kunden für Gebrauchtfahrzeuge sind kleinere Betriebe mit leichtem Fahrzeugeinsatz und oft eigener Werkstatt. Für die Gebrauchtfahrzeuge wird von dem Unternehmen kein Full-Service mehr angeboten, da dies zu teuer ist. Auch für schwere Einsätze sind sie nicht mehr geeignet. Das Unternehmen hat bei Rental-Verträgen das Interesse, fremde Fahrzeuge auszutauschen und eigene Fahrzeuge abzusetzen. Fremdfahrzeuge werden ausgetauscht sobald dies wirtschaftlich darstellbar ist.

13.3.2 Betrieb einer Fahrzeugflotte in Verantwortung des Kunden (Referenzmodell)

Als Referenzmodell zum Vergleich mit dem Flottenmanagement in der Verantwortung des Unternehmens wird der Flottenbetrieb in Verantwortung eines Kunden herangezogen. Hier liegen uns leider nur allgemeine Informationen vor, die im Folgenden vorgestellt werden:

Fahrzeuge, die im Eigentum des Kunden sind und auch von ihm in eigener Werkstatt repariert werden, haben eine wesentlich längere Lebensdauer²¹³ als die von dem Unternehmen für Rental-Verträge genannten 3-5 Jahre. Dicke und Schneider, 1994 geben als gebräuchliche Lebensdauer für die kalkulatorische Abschreibung die in Tabelle 38 angegebenen Werte in Abhängigkeit vom Einsatz an. Das Unternehmen gibt als Gesamtlebensdauer 10 - 40 Jahre an, abhängig von der Branche, vom Einsatz und vom Fahrzeugtyp. Eine lange Lebensdauer wird z.B. im Lager von Pharmafirmen erreicht (30-40 Jahre), eine extrem kurze Lebensdauer z. B. in Fisch verarbeitenden Betrieben und Gießereien (ca. 2 Jahre).

Tabelle 38_ Gebräuchliche Lebensdauer als Grundlage für die kalkulatorische Abschreibung aus: Dicke und Schneider, 1994

	Elektro- Flurförderzeuge	Verbrennungsmotorisch angetriebene Flurförderzeuge	Batterie	Ladegerät
	Jahre	Jahre	Jahre	Jahre
Einsatz leicht	12 - 15	8 - 12	5 - 6	15
Einsatz mittelschwer	10 - 12	6 - 8	4 - 5	15
Einsatz schwer	6 - 10	4 - 6	4	12

Nach Rödiger (1997) betragen die Wartungskosten für Gabelstapler in den ersten 5 Jahren ca. 10% der Anschaffungskosten pro Jahr. Dieser Wert wird vom Partnerunternehmen bestätigt. Danach steigen die Wartungskosten, können aber nicht so genau beziffert werden. Mehdorn (1997) von der Chemischen Fabrik Budenheim berichtet für 3 bis 10 Jahre alte Stapler von Instandhaltungskosten, die die Hälfte der Anschaffungskosten und mehr erreichten. Damit sind die Reparaturen irgendwann nicht mehr wirtschaftlich. Repariert der Kunde die Fahrzeuge in der eigenen Werkstatt, fällt ihm das in der Regel gar nicht auf, da er diese Kosten nicht getrennt aufstellt. Investitionsentscheidungen werden daher selten zugunsten von Fahrzeugen, sondern eher für andere Betriebseinheiten gefällt. Diese Fahrzeugflotten sind deshalb sehr viel älter, als die vom Hersteller bzw. Flottenmanager betriebenen. Der Umfang der Fahrzeugneuanschaffung durch Kunden ist damit deutlich kleiner als für Flotten, die in der Verantwortung von dem Unternehmen betrieben werden.

Das Unternehmen führt Flottenmaterialflussanalysen auch für Kunden durch, die ihre Flotte in eigener Regie weiter betreiben wollen. Inwieweit die in diesen Analysen ermittelten Potenziale vom Kunden anschließend umgesetzt werden, wird vom Unternehmen nicht ermittelt. Insbesondere gibt es keine Informationen zum Fahrzeugaustausch oder zur Verkleinerung der Flotte nach einer Materialflussanalyse.

²¹³Mit Lebensdauer ist die Leistung des Produkts bis zur Entsorgung gemeint, der Begriff wird hier synonym mit dem Begriff Nutzungsdauer verwendet.

13.3.3 Effizienzverbesserungen von Fahrzeugen, Batterien und Ladesystemen

Durch die Neuanschaffung von Fahrzeugen verbessert sich oft auch die Energiebilanz der Fahrzeuge und Ladesysteme. Für Flurförderfahrzeuge stehen Daten zur Effizienzverbesserung für zwei Fahrzeugmodelle (Gegengewichtsstapler) zur Verfügung. Für diese beträgt die Effizienzverbesserung im VDI-Zyklus²¹⁴ innerhalb von 8 Jahren 0 bzw. 2%. Nach Aussage des Unternehmens steht aber für diese Produktklasse (Gegengewichtsstapler) eine neue Fahrzeugserie kurz vor der Marktreife, bei der durch den Wechsel von Gleichstrom- auf Drehstromtechnik eine Effizienzverbesserung im VDI-Zyklus von 10-15% erwartet wird. Eine 1995 von dem Unternehmen durchgeführte Studie, in der Schubmaststapler von 1995 mit Vorgängermodellen von 1987 verglichen wurden, ergab eine Verringerung des Stromverbrauchs im Lastspiel von 25-30% durch die neuen Fahrzeuge. Ein weiterer Vergleich wurde zwischen Fahrzeugen von 1987 und noch älteren Fahrzeugen (24V-Technik) durchgeführt. Hieraus ergab sich ein Vorteil von 20-40% der neuen Fahrzeuge (alle Angaben ohne Berücksichtigung der Ladetechnik). Allgemein erfolgen Effizienzverbesserungen der Fahrzeuge sprunghaft durch Innovationsschübe. *Zwischen* Innovationsschüben verbessert sich die Effizienz der Fahrzeuge dagegen nur wenig. Die Angabe einer mittleren Effizienzverbesserung für die Fahrzeuge ist daher problematisch. Für die Rechnung nehmen wir eine mittlere Effizienzverbesserung der Fahrzeuge von 22% in 10 Jahren an.

Bei der Batterie- und Ladetechnik stehen verschieden effiziente Systeme nebeneinander, die sich deutlich in den Anschaffungskosten unterscheiden.

Für Flurförderzeuge werden zu 95% Transformatorengeräte mit der so genannten „Wa-“ oder „Wo-Wa-Ladetechnik“ in Kombination mit flüssigen Bleitraktionsbatterien (PzS-Batterien) eingesetzt. Dieses System hat einen Wirkungsgrad von ca. 56%. Dieser Wirkungsgrad kann durch zusätzliche Elektrolytumwälzung (EUW) beim Ladevorgang um 12,5% auf insgesamt ca. 64% verbessert werden. Hierbei wird der Elektrolyt durch Einblasen von Luft in den unteren Bereich der Zellen während des Ladevorgangs durchmischt. Dadurch kann die bis zu 4h dauernde Nachladezeit, in der nur noch 5% der Kapazität zugeladen wird und der Energieverbrauch im Wesentlichen in die Durchmischung des Elektrolyten geht, entscheidend verkürzt werden.

Zu 5% werden als Ladegeräte hochfrequenz-getaktete Geräte mit „IU-Ladetechnik“ eingesetzt (Hochfrequenz Technik). Hier kann die Gesamtladezeit noch weiter auf bis zu 6h reduziert werden. HF-Technik wird eingesetzt, weil sie kleinere Abmessungen bei gleicher Leistung ermöglicht. Außerdem haben die Batterien durch die schonendere Ladetechnik eine um ca. 10% höhere Lebensdauer.

Auch die HF-Technik wird mit EUW angeboten. Für HF-Technik mit EUW in Kombination mit einer PzS-Batterie wird hier ein Wirkungsgrad von 81% angenommen. Dies entspricht einer Effizienzverbesserung gegenüber der konventionellen Technik von 31%.

In Kombination mit HF-Technik können auch wartungsfreie Gelbatterien eingesetzt werden. Sie haben lange Ladezeiten (ca. 12h) und können nur für leichte Einsätze genutzt werden. Da keine Gasentwicklung bei der Ladung wie bei den PzS-Batterien entsteht, eignen sie sich u.a. für Verkaufsräume. Der Gesamtwirkungsgrad der HF-Technik in Verbindung mit einer Gelbatterie liegt bei 76%.

²¹⁴Der Energieverbrauch eines Flurförderfahrzeuges setzt sich aus dem Energieverbrauch des Fahrmotors und dem des Hubmotors zusammen. Um den Energieverbrauch verschiedener Fahrzeuge vergleichen zu können, wurde in VDI-RL 2198 ein Arbeitsspiel definiert, das sich aus einem Fahr- und einem Hubanteil zusammensetzt und damit z.B. das Be- und Entladen eines LKW oder auch ein Umsetzspiel im Lagerbereich abbildet. Die Fahrstrecke beträgt 2 x 30m pro Spiel. Nach jeder Fahrstrecke wird die Nennlast auf Hubhöhe 2,0m gebracht, also zweimal pro Arbeitsspiel. Der Energieverbrauch nach VDI-Zyklus ist definiert als der Energieverbrauch des Fahrzeugs beim Durchlaufen von 45 dieser Zyklen. Dieser Ablauf dauert eine Stunde.

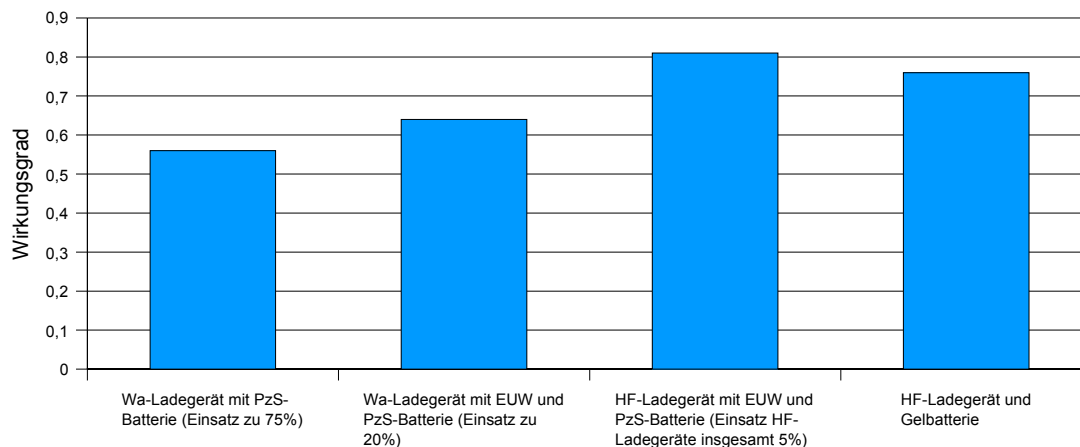


Abbildung 82_Wirkungsgrade unterschiedlicher Ladesysteme

Die Kosten der verschiedenen Batteriesysteme unterscheiden sich erheblich. In der Tabelle 39 wird dies exemplarisch für eine 48V - 750 Ah-Batterie veranschaulicht.

Tabelle 39_Kosten verschiedener Ladegeräte für 48V-750Ah-Batterie

Ladetechnik	Kennzahlen Ladegerät	Ladezeit	Listenpreis (o. MWSt)
Wa-Kennlinie	48 V / 120 A	11 h	3.900,00 DM
Wa-Kennlinie + EUW	48 V / 120 A	9,5 h	4.700,00 DM
Wo-Wa-Kennlinie mit EUW	48 V / 150 A	8 h	6.290,00 DM
IU-Kennlinie mit PzS-Batterie ohne EUW	48 V / 90 A	8-12 h	6.380,00 DM
IU-Kennlinie mit PzS-Batterie ohne EUW	48 V / 170 A	minimal 6 h	10.295,00 DM

Die Batteriekosten kommen jeweils noch dazu (z.B. 48 V - 750 Ah-Batterie >20.000,- DM). Wesentliche Auswahlkriterien für Ladesysteme sind die Kosten sowie die Ladezeit (Batterieverfügbarkeit). Im Einschichtbetrieb wird eher auf konventionelle Ladetechnik zurückgegriffen. Im Mehrschichtbetrieb ist man dagegen auf kurze Ladezyklen angewiesen und wird ein System mit ausreichend kurzer Ladezeit wählen.

Das Unternehmen gibt derzeit hauptsächlich herkömmliche Batterie- und Ladetechnik (Transformatorengeräte) mit Neufahrzeugen an seine Kunden weiter (zu 90-95%) Nur zu 5% wird HF-Technik eingesetzt. Batterien und Ladesysteme mit EUW werden insgesamt zu 20-25% sowohl in Kombination mit herkömmlicher wie auch mit HF-Technik eingesetzt²¹⁵.

Diese Batterien haben eine durchschnittliche Lebensdauer von 1000-1500 Ladezyklen. Bei 250 Arbeitstagen im Einschichtbetrieb ergibt sich daraus eine Lebensdauer von maximal 6 Jahren. In dieser Zeit nimmt der Wirkungsgrad der Batterie um 15-20% ab. Ladegeräte haben eine Lebensdauer von 12 bis 15 Jahren (Dicke und Schneider 1994). Durch die im

²¹⁵Bei Rental- und Leasingverträgen wählt der Kunde wie auch beim Kauf die genutzten Produkte selbst aus. Der Einsatz effizienter Batterie- und Ladetechnik liegt daher nicht in der Hand des Unternehmens, da Auswahlkriterium neben der Ladezeit in erster Linie die Kosten sind, und „der Kunde uns das nicht bezahlt“.

Vergleich zum Flurförderzeug kurze Lebensdauer der Batterien, werden Batterien mehrfach während der Lebensdauer der Flurförderzeuge gewechselt. Da bisher überwiegend herkömmliche Ladetechnik verwendet wird, besteht hier ein großes Energieeinsparpotenzial, das auch durch Nachrüsten von alten Fahrzeugen erschlossen werden kann.

13.3.4 Datengrundlage

Das Unternehmen hat uns Daten über das Ergebnis einer Flottenmaterialflussanalyse für einen Kunden zur Verfügung gestellt. Diese Daten beinhalten den Umfang der alten Flotte, die verwendeten Fahrzeugtypen und deren Alter sowie den Umfang und die Fahrzeugtypen der neuen Flotte. Eine Übersicht über die zur Verfügung gestellten Daten liefert Tabelle 40.

Tabelle 40_ Flottenmanagement Beispielprojekt: Fischverarbeitender Betrieb; zur Verfügung gestellte Daten

Alte Flotte	Neue Flotte
Umfang: 78 Fahrzeuge	Umfang: 57 Fahrzeuge davon 40 Neufahrzeuge
31 verschiedene Fahrzeugtypen von 14 verschiedenen Herstellern	13 verschiedene Fahrzeugtypen (neu) und 12 verschiedene Fahrzeugtypen (alt)
Fahrzeugalter (Durchschnitt 15 Jahre)	Fahrzeugalter (Durchschnitt 4 Jahre)
Einsatzorte der Fahrzeuge (4 verschiedene)	Einsatzorte der Fahrzeuge (4 verschiedene)
	Schätzung für Wegstreckenoptimierung (15-25%)

Weiter wurden Daten zu den Materialgerüsten der Fahrzeuge sowie zu ihrem Stromverbrauch zur Verfügung gestellt.

13.3.4.1 Datengenauigkeit

Um den Herstellungsaufwand für die Fahrzeuge abzuschätzen, stützten wir uns auf Schätzungen der Produktmanager zu den Materialgerüsten. Diese wurden nicht für einzelne Fahrzeuge, sondern für die jeweilige Fahrzeugserie angegeben.

Den Entsorgungsaufwand eines Fahrzeuges übernehmen wir aus einer KEA-Studie für PKW (Hoffmann 1996). Hier ergibt sich eine Energiegutschrift von 500 MJ für die gesamte Entsorgung eines Altfahrzeugs von 1,07 Tonnen. Umgerechnet auf die jeweiligen Gewichte der hier betrachteten Fahrzeuge erhalten wir Energiegutschriften für die Fahrzeugentsorgung in Höhe von 140 MJ (Mitgängergeräte) bis 1030 MJ (Fahrersitzgeräte). Dies entspricht 1% des jeweiligen Aufwandes für die Fahrzeugherstellung. Die Entsorgung wird daher im Folgenden vernachlässigt.

Die Stromverbrauchswerte für die Fahrersitzgeräte²¹⁶ stehen uns als Energieverbräuche nach VDI-Zyklus zur Verfügung. Die Stromverbräuche der Fahrersitzgeräte sind damit tendenziell zu hoch angesetzt, da das VDI-Spiel einen geringen Fahranteil mit einem großen Hubanteil beschreibt. In der Praxis wird dagegen mehr gefahren, so dass sich wegen der höheren Effizienz des Fahrmotors in der Praxis ein günstigerer Energieverbrauchswert ergibt. Weiter wird der Energieverbrauch in der Praxis von fahrmotorunabhängigen Parametern dominiert. So ergeben sich durch das Zusammenspiel von Bereifung,

²¹⁶Als 'Fahrersitzgerät' werden alle Flurfördergeräte mit einem Fahrersitz bezeichnet. Zu ihnen gehören u.a. die Gabelstapler und die Schubmaststapler.

Bodenbeschaffenheit, Temperatur und Fahrerverhalten Abweichungen des Energieverbrauchs vom VDI-Zyklus-Wert von 20% in beiden Richtungen. Von anderer Seite wird die *Streubreite* des Energieverbrauchs im VDI-Zyklus auf 5% bei Ausführung durch einen Fahrer und auf 10-15% bei der Ausführung durch verschiedene Fahrer (sanfte vs. ruppige Fahrweise, Überstromfahren) beziffert.

Für die Stromverbräuche der Mitgängergeräte²¹⁷ greifen wir auf begründete Abschätzungen aufgrund der Motorleistungen zurück. Die Genauigkeit dieser Werte kann nicht angegeben werden. Aufgrund ihrer geringen Größe innerhalb des Flottenverbrauchs fällt diese Unsicherheit aber nicht besonders ins Gewicht.

- Effizienzverbesserung der Fahrzeuge: Zur Effizienzverbesserung der Fahrzeuge haben wir nur für zwei Fahrzeugmodelle Angaben erhalten. Die Effizienzverbesserung wird hier nach VDI-Zahlen für einen Zeitraum von 8 Jahren zwischen 0% bzw. 2% angenommen. Alternativ wird mit dem oben genannten Durchschnittswert der Effizienzverbesserung von 22% in 10 Jahren gerechnet. Welcher Wert für die Effizienzverbesserung der Fahrzeuge im langjährigen Mittel realistischer ist, kann aufgrund der Datenlage nicht beurteilt werden.
- Effizienzverbesserung der Ladetechnik: Die möglichen Effizienzverbesserungen durch Auswahl effizienter Ladetechnik liegen bei 10-30%. Hier gibt es leider nur Durchschnittswerte für die Ausrüstung von Fahrzeugen mit herkömmlicher und effizienter Ladetechnik (zu 90-95% herkömmliche Ladetechnik, zu 5% HF-Technik; insgesamt Anteil an EUW: 20-25%).
- Für die Größe der Wegstreckenreduzierung gibt es keine gemessenen Werte. Uns wurden geschätzte Werte für die Einsparung von Strecken von 15 bis 45 % genannt.
- Auch zu der Anzahl der durchschnittlich gefahrenen Betriebsstunden der Fahrzeuge gibt es nur Schätzungen (Fahrersitzgeräte: nicht optimierte Flotte: 1.000 h/a, optimierte Flotte 1.200 h/a; Mitgängergeräte: 500 h/a). Genauigkeiten konnten nicht angegeben werden.
- Zum energetischen Aufwand der Fahrzeugwartung und -reparatur standen uns keine Informationen zur Verfügung.

13.3.5 Referenzmodell:

Um das Flottenmanagement in der Verantwortung des Flurförderzeugherstellers mit dem Flottenbetrieb in Verantwortung eines Kunden vergleichen zu können, muss ein Referenzmodell herangezogen werden. Die Datenlage erschwert jedoch eine umfassende Modellierung. Bekannt sind der Fahrzeugtyp und das Alter der Fahrzeuge des Kunden, nicht aber ihre Effizienz. Unklar ist das Ausmaß von Fahrzeugneuanschaffungen, da durch den Kunden auch bei Wettbewerbern gekauft wird. Weiterhin wären auch Informationen zum Wartungs- und Reparaturaufwand wichtig. Das Referenzmodell bildet also die Fahrzeugneuanschaffungsrate sowie die Effizienz des Fahrzeugbetriebs und der Logistik nicht angemessen ab.

Wird eine Flottenmaterialflussanalyse für einen Kunden durchgeführt, der die Flotte dann weiter in eigener Verantwortung betreibt, ist das Ausmaß der in der Praxis erreichten Verbesserungen sowie die in diesem Zusammenhang anfallende Fahrzeugneuanschaffung durch den Kunden mit den vorliegenden Daten nicht abschätzbar.

²¹⁷Als 'Mitgängergerät' werden die Flurförderzeuge bezeichnet, bei denen alle Lenk- und Bedienfunktionen durch den mitgehenden Bediener ausgeführt werden. Hierzu gehören u.a. die Hubwagen.

13.3.6 Methodik und Vorgehen

Die Durchführung einer Energiebilanz des Flottenmanagements des Flurförderzeugherstellers steht vor folgenden Herausforderungen:

- hohe Komplexität des Beispielprojektes
- geringe Datenunterlegung
- wenig Informationen zum Referenzmodell

Daher wurden drei Strategien verfolgt, um diesen Schwierigkeiten zu begegnen:

- Es wurden Modellflotten von je 10 Fahrzeugen eines Fahrzeugtyps (Fahrsitzgeräte, Mitgängergeräte) gebildet, um die Komplexität zu reduzieren und den Datenbedarf zu verringern.
- Es wurden die einzelnen Elemente der Energieeinsparung im Betrieb (Logistikoptimierung durch Flottenmaterialflussanalyse, Effizienzverbesserung Fahrzeuge, Effizienzverbesserung Batterien und Ladesysteme) voneinander getrennt bilanziert.
- Es wurde vereinfachend angenommen, dass im Referenzmodell keine Veränderungen stattfinden, d.h. keine Logistikoptimierung und keine Fahrzeugneuanschaffung. Die energetischen Vor- und Nachteile des Flottenmanagements durch das Unternehmen werden daher einander gegenübergestellt.

Im Einzelnen wurden folgende Fälle betrachtet:

- Energieeinsparung im Betrieb durch Effizienzverbesserung der Fahrzeuge vs. Energieaufwand der Fahrzeugherstellung für die Modellflotte (regelmäßiger Fahrzeugaustausch im Rental).
- Energieeinsparung durch Logistikoptimierung vs. Energieaufwand der Fahrzeugherstellung für die Modellflotte (einmaliger Fahrzeugaustausch nach Flottenmaterialflussanalyse).
- Energieeinsparung durch Einsatz effizienter Batterie- und Ladetechnik in alten Fahrzeugen (Effizienzverbesserung ohne Fahrzeugaustausch).

13.3.6.1 Bilanzgrenzen

Allgemein stellt sich bei Bilanzierungen die Frage nach dem Umfang des Bilanzraumes. Hier geht es insbesondere um die Berücksichtigung, Ermittlung und Zuweisung von indirekten Aufwendungen. Die folgende Tabelle 41 gibt stichwortartig Auskunft über die in der Rechnung berücksichtigten und nicht berücksichtigten Positionen. Die Auswahl ist nicht nur durch Relevanz der einzelnen Posten für das Ergebnis geprägt, sondern auch stark durch die Datenverfügbarkeit. Insbesondere die in der rechten Spalte oben genannten Posten (Herstellung der Ladegeräte und Wartungsaufwand der Fahrzeuge) haben sicherlich einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am Ergebnis, konnten hier jedoch wegen fehlender Daten nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 41 Umfang des Bilanzraumes

im Bilanzraum	außerhalb des Bilanzraumes
Herstellung der Fahrzeuge (Herstellung der Batterien)	Herstellung und Wartung der Ladegeräte Wartung der Fahrzeuge (z.B. Reifen, Ersatzteile, Reinigung)
Stromverbrauch	Wartung der Batterien (Wasser-, Schwefelsäureverbrauch)
(Entsorgung von Fahrzeugen und Batterien)	Lebensdauer der Fahrzeuge und Leistungskurve der Fahrzeuge über die Lebensdauer (energetische Abschreibung) Generalüberholung der Fahrzeuge nach Rental-Einsatz Energieverbrauch Transportleitstand (EDV) Fahrverhalten der Fahrer (Schulungen) Energieverbräuche der Verwaltungen (Flurförderzeughersteller, Kunde)

Im Rental tauscht das Unternehmen die Fahrzeuge beim Kunden nach 3-5 Jahren aus. Danach werden sie überarbeitet und second-hand weiterverkauft. Es stellt sich daher die Frage nach der Verteilung der energetischen Abschreibung auf die Erstnutzung im Rental und die Zweitnutzung im Second-hand-Betrieb. Da uns unterstützende Informationen fehlten, wurde hier lediglich untersucht, ob sich das Fahrzeug während seiner Gesamtlebensdauer amortisiert.

13.3.6.2 Bilanzierungsmethode

Die Energiebilanzen wurden nach der Methode des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) erstellt²¹⁸. Im Rahmen dieser Untersuchung war es nicht möglich, die Energiedaten aller für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Flurförderzeugen relevanten Prozesse direkt zu erfassen. Stattdessen wurde auf tabellierte Werte des KEA zurückgegriffen (Datenbank der Forschungsstelle für Energiewirtschaft ffe). Dadurch beschränkt sich die Ermittlung des KEA in dieser Untersuchung auf das Erheben der Materialgerüste (Materialien und Gewichte) sowie der Verbrauchsdaten der Fahrzeuge und Batteriesysteme und die Verknüpfung dieser Daten mit den in der ffe-Datenbank tabellierten KEA-Werten.

Bilanzgrenzen: Die verwendeten KEA-Werte für die Strombereitstellung schließen indirekte Aufwendungen durch Betriebsmittel (Gebäude und Anlagen) und Betriebsstoffe ein. Die verwendeten KEA-Werte für Metalle und Kunststoffe berücksichtigen Fertigungsstoffe und Betriebsstoffe bei der Bilanzierung. Betriebsmittel (Gebäude und Anlagen) wurden bei der Bilanzierung hingegen nicht berücksichtigt (Corradini et al. 1999). Weiter sind Aufwendungen für Fertigung und Montage nicht enthalten. Sie wurden zur Berechnung der Fahrzeugherstellung hier pauschal zu (15 ±5)% der Materialaufwendungen angenommen. Wir gehen bei dieser Schätzung von einem Vertrauensintervall von ±30% aus.

²¹⁸ Vgl. VDI 1995

13.3.7 Energiebilanzen

13.3.7.1 Energieeinsparung im Betrieb durch Effizienzverbesserung der Fahrzeuge vs. Energieaufwand der Fahrzeugherstellung (regelmäßiger Fahrzeugaustausch im Rental)

Im Rental werden Fahrzeuge regelmäßig nach 3-5 Jahren ausgetauscht und durch neue ersetzt. Dem daraus resultierenden energetischen Herstellungsaufwand der Fahrzeuge wird hier die Energieeinsparung im Betrieb durch Effizienzverbesserungen der neuen Fahrzeuge gegenübergestellt. Der Einfluss der Wegstreckenoptimierung (z.B. in Form einer Energiegutschrift) wird hier wegen der Vergleichbarkeit nicht berücksichtigt.

**Tabelle 42_ Energetische Bewertung der Herstellung neuer Fahrzeuge :
Fahrersitzgeräte (oben)
Energetische Amortisation der Fahrzeugherstellung durch Effizienzverbesserungen im Betrieb: Fahrersitzgeräte (unten)**

Materialgerüst													
	Gewicht Fahrzeug [kg]	Gußeisen [kg]	gewalzte Profile [kg]	Halbzeuge, gewalzt, ... [kg]	Bleche, Blechprofile [kg]	Kupfer [kg]	Kunststoffe [kg]	diverse [kg]	KEA Fahrzeug [MJp]	Gewicht Batterie [kg]	KEA Batterie [MJp]	KEA Fertigung	KEA Fahrzeug + Batterie [MJp]
EFG 1500	2.132	800	400	200	625	64	21	21	58.904	708	17.700	11.491	88.095
EFG 1800	2.204	800	400	200	694	66	22	22	60.772	856	21.400	12.326	94.498
KEA [MJp/kg]		24	24	35	23	58	65	170		25		15%	

altes Modell mit Wa-Lader										neues Modell mit Wa-Lader			
	Betriebsstunden/a [h]	Energieverbrauch mit Wa-Lader [kWh/h]	Energieverbrauch ohne Wa-Lader [kWh/h]	Effizienzverbesserung	KEA-Einsparung / a [MJp/a]	energet. Amortisation Fahrzeugherstellung [a]	hypothet. Effizienzverbesserung	KEA-Einsparung / a [MJp/a]	energet. Amortisation Fahrzeugherstellung [a]				
EFG 1500	1.200	7,32	7,14	2%	2.473	36	11%	11.062	8				
EFG 1800	1.200	8,21	8,21	0%	0	-	11%	12.406	8				

Die Rechnung wird exemplarisch für zwei verschiedene Modelle von Fahrersitzgeräten²¹⁹ (Tabelle 42) und für zwei Modelle von Mitgängergeräten²²⁰ (Tabelle 43 und Tabelle 44) durchgeführt. In Tabelle 43 wird auf der linken Seite die Effizienzverbesserung der neuen Fahrzeugmodelle gegenüber den älteren Modellen bei gleich bleibender Ladetechnik (PzS-Batterie mit Wa-Lader) dem Energieaufwand für die Herstellung der Fahrzeuge gegenübergestellt. Durch die geringe Größe der Effizienzverbesserungen der Fahrzeuge (EFG 1500: 2,5%; EFG 1800: 0%) ergibt sich eine theoretische energetische Amortisation von 36 Jahren im ersten Fall bzw. keine Amortisation im zweiten Fall.

Nimmt man statt den Stromverbrauchsdaten für das neue Fahrzeug hypothetisch eine durchschnittliche Effizienzverbesserung von 22% in 10 Jahren (=11% in 5 Jahren) an (rechte Seite von Tabelle 42), ergibt sich für beide Fahrzeuge eine energetische Amortisation nach 8 Jahren. Bei einer Effizienzverbesserung der neuen Fahrzeuge von größer gleich 11% kann

²¹⁹Fahrersitzgeräte werden hier exemplarisch betrachtet durch die Elektro-Dreiradstapler mit Frontantrieb EFG 1500 (Tragfähigkeit 1500 kg) und EFG 1800 (Tragfähigkeit 1800 kg).

²²⁰Mitgängergeräte werden hier exemplarisch betrachtet durch den Elektro-Dreirad Gabelhubwagen EGU 1800 (Tragfähigkeit 1800 kg) und den Elektro-Deichsel-Stapler EGV 1400 (Tragfähigkeit 1400 kg).

damit eine energetische Amortisation innerhalb der Lebensdauer des Fahrzeugs erreicht werden.

Für Mitgängergeräte liegen uns keine Daten zur Effizienzverbesserung neuer Fahrzeuge vor. In Tabelle 43 wurde daher dem Energieverbrauch der Referenzfahrzeuge eine ‚gesetzte‘ Effizienzverbesserung von 20% gegenübergestellt. Durch den geringen Energieverbrauch der Fahrzeuge sowie die geringe Betriebsstundenzahl (500 Betriebsstunden pro Jahr) ergibt sich unter dieser Annahme eine rechnerische Amortisation innerhalb von 16 bzw. 29 Jahren. Hier ist zu fragen, ob sich diese Fahrzeuge bei der o.g. Effizienzverbesserung von 20% überhaupt während ihrer Nutzungsdauer energetisch amortisieren!

Tabelle 43_ Energetische Amortisation der Fahrzeugherstellung durch Effizienzverbesserungen im Betrieb: Mitgängergeräte

		neues Modell mit 20% Energieeinsparung		Effizienz- verbesserung	KEA- Einsparung / a [MJp/a]	energet. Amortisation Fahrzeug- herstellung [a]
	Betriebs- stunden/a [h]	Energie- verbrauch gesamt [kWh/h]	Energie- verbrauch gesamt [kWh/h]			
EGU 1800	500	0,89	0,71	20%	1.019	16
EGV 1400	500	1,16	0,93	20%	1.328	29

Tabelle 44_ Energetische Bewertung der Herstellung neuer Fahrzeuge : Mitgängergeräte

Gewicht Fahrzeug [kg]	Materialgerüst							Gewicht Batterie [kg]	KEA Fertigung [MJp]	KEA Fahrzeug [MJp]
	mittlerer Stabstahl [%]	Grobblech [%]	Feinblech [%]	Alu- Druckguß [%]	Kupfer [%]	Kunst- stoffe [%]	Poly- urethan [%]			
300	0,4	0,4	0,08	0,02	0,02	0,04	0,04	150	2.668	16.006
800	0,4	0,4	0,08	0,02	0,02	0,04	0,04	270	6.464	38.782
	27,7	19,8	27	170	60	60	95	25	20,00%	

Wegen der großen Unsicherheit in den Angaben zur Effizienzverbesserung und ihrer großen Bedeutung für die energetische Amortisation der Fahrzeugherstellung wird in Abbildung 82 die Abhängigkeit der energetischen Amortisationsdauer der Fahrzeuge von der Höhe der Effizienzverbesserungen für alle oben betrachteten Fahrzeuge dargestellt.

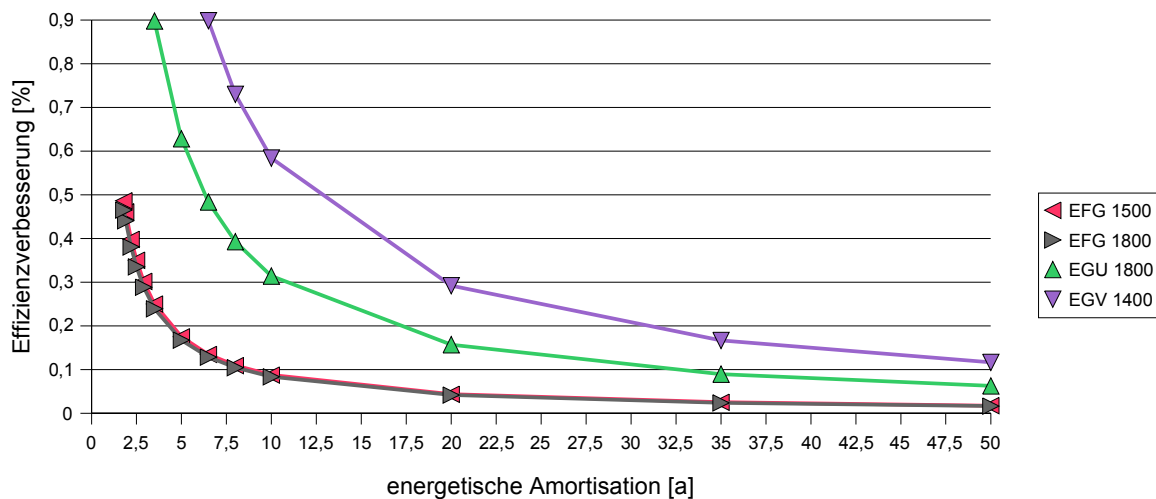


Abbildung 83_Energetische Amortisation der Fahrzeugherstellung durch Effizienzverbesserungen im Betrieb für Fahrersitzgeräte und Mitgängergeräte

13.3.7.2 Energieeinsparung durch Logistiko Optimierung vs. Energieaufwand der Fahrzeugherstellung (einmaliger Fahrzeugaustausch nach Flottenmaterialflussanalyse)

Bei der Logistiko Optimierung werden nach einer Flottenmaterialflussanalyse die Leerfahrten und Wegstrecken verringert, so dass insgesamt 15-25% weniger gefahren werden muss. Um den gleichen Prozentbetrag werden auch Einsparungen an Betriebsmitteln (Strom, Treibstoffe) erreicht. Die Auswirkungen der Logistiko Optimierung auf die Einsatzstunden einzelner Fahrzeuge lassen sich nicht angeben. Durch das Ziel, Personalkosten zu minimieren, ist jedoch anzunehmen, dass die größten Betriebsstundenreduktionen bei den Fahrersitzgeräten anfallen. Daher wird im Folgenden die Größe der Energieeinsparung durch Logistiko Optimierung für eine Modellflotte aus 10 Fahrersitzgeräten berechnet. Tabelle 45 zeigt für eine Beispielflotte aus 10 Fahrersitzgeräten die Größe des jährlichen Energieverbrauchs (in kWh/a und MJp/a) und die Größe der rechnerischen Einsparungen bei Logistiko Optimierungen von 15%, 20% und 25%.

Tabelle 45_Energieeinsparung beim Flottenbetrieb durch Wegstreckenoptimierungen von 15%, 20% und 25% und Amortisation Fahrzeugherstellung durch Energieeinsparung

	Anzahl	Betriebsstunden/Fahrzeug*a [h]	Energieverbrauch/Fahrzeug*a [kWh/a]	KEA Energieverbrauch/Fahrzeug*a bzw./Flotte*a [MJp/a]	Wegstreckenoptimierung= Betriebsstunden-einsparung (Annahmen) [h]	KEA-Einsparung Flotte [MJp/a]	Einsatz Neufahrzeuge [Stck]**	KEA Fahrzeugherstellung [MJp]	energet. Amortisation Fahrzeugherstellung [a]
EFG 1500, alt	5	1.000	7.321	83.811				88.095	
EFG 1800, alt	5	1.000	8.214	94.034				94.498	
Flotte	10	10.000	77.675	889.223	1000	88.922	8	704.758	8
					1500	133.384	7	616.663	5
					2000	177.845	7	616.663	3,5
					2500	222.306	7	616.663	3
					3000	266.767	6	528.568	2

**Fahrzeugbedarf: Bei Wegstreckenoptimierung von 10%: 8 Fahrzeuge; bei 15, 20 und 25%: 7 und bei 30%: 6 Fahrzeuge (Annahme: Betriebsstunden/Fahrzeugneu*a = 1200h)

Diesen Einsparungen durch Logistiko Optimierung soll hier der Energieverbrauch durch die Anschaffung neuer Fahrzeuge gegenübergestellt werden, wie sie durch das Unternehmen vorgenommen würden. Dazu wird wieder die Modellflotte betrachtet und als Extremfall angenommen, dass nach der Optimierung ausschließlich neue Fahrzeuge eingesetzt werden. Die Tabelle zeigt, dass der jährliche Energieverbrauch eines Fahrzeugs (Fahrersitzgerät) in der Größenordnung des Energiebedarfs für die Fahrzeugherstellung liegt (vgl. dazu Tabelle 43). Bei angenommenen Wegstreckenoptimierungen von 15%, 20% oder 25% reduzieren sich die jährlichen Betriebsstunden der Fahrzeugflotte entsprechend. Nimmt man an, dass die Flotte aufgrund der Optimierung um 3 Fahrzeuge verkleinert wird und für die verbleibenden Transportaufgaben neue Fahrzeuge angeschafft werden, die jeweils 1.200 Betriebsstunden im Jahr leisten, amortisiert sich der Energiebedarf für die Fahrzeugherstellung durch die Energieeinsparung im Betrieb durch die Wegstreckenoptimierung in 5, 3,5 bzw. drei Jahren. Da die Amortisationszeit neben der Energieeinsparung im Betrieb auch von der Anzahl der neu eingesetzten Fahrzeuge abhängig ist, wurde hier zum Vergleich die Größe der energetischen Einsparungen sowie die Amortisationszeit für Logistiko Optimierungen von 10% und 30% berechnet. Die Herstellung neuer Fahrzeuge amortisiert sich hier durch die Einsparungen im Betrieb innerhalb von 8 Jahren (10% Logistiko Optimierung, Einsatz von 8 Neufahrzeugen) bzw. innerhalb von 2 Jahren (30% Logistiko Optimierung, Einsatz von 6 Neufahrzeugen).

Ungeklärt bleibt hier die Frage, ob die Anschaffung neuer Fahrzeuge aus technischer Sicht angezeigt war, oder ob hier ein energetischer Effizienzgewinn durch die Neuanschaffung von Fahrzeugen „verschenkt“ wurde.

13.3.7.3 Energieeinsparung durch Verwendung effizienter Batterie- und Ladetechnik in alte Fahrzeuge (Effizienzverbesserung ohne Fahrzeugaustausch)

Die Effizienzverbesserung durch Einsatz moderner Batterie- und Ladetechnik beträgt zwischen 12,4% (Erweiterung von herkömmlicher Technik durch EUW) und 30% (Ersatz von herkömmlicher Technik durch HF-Ladetechnik mit EUW). Da in Flurförderzeugen zu 75% herkömmliche Ladetechnik verwendet wird, zu 20% herkömmliche Ladetechnik mit EUW und zu 5% HF-Technik mit EUW und da Batterien nach 3-5 Jahren technisch verbraucht sind und ausgewechselt werden müssen, ist das Einsparpotential durch Einsatz moderner Ladetechnik in alte Fahrzeuge erheblich.

Die möglichen Energieeinsparungen liegen prozentual in der gleichen Höhe wie die Effizienzverbesserungen zwischen den verschiedenen Ladesystemen. Tabelle 46 weist die Daten exemplarisch für ein Fahrersitzgerät und ein Mitgängergerät aus. Es wird jeweils der Gesamt-Energieverbrauch (Fahrzeug + Batterie + Ladegerät) pro Stunde, pro Jahr und in Primärenergieeinheiten pro Jahr angegeben. Es fällt auf, dass die absolute Energieeinsparung durch Einsatz von Hochfrequenz-Ladetechnik beim Mitgängergerät im Vergleich zum Fahrersitzgerät kaum ins Gewicht fällt.

13.3.8 Diskussion der Ergebnisse / Zusammenfassung und Bewertung

Der regelmäßige Fahrzeugaustausch im Rental geht mit einem hohen Energieaufwand durch die Fahrzeugherstellung einher. Wegen der Unsicherheit der Daten für die Effizienzverbesserungen der Fahrzeuge wurden für die Fahrersitzgeräte zwei Varianten berechnet:

Tabelle 46_ Energieeinsparpotentiale durch Einsatz effizienter Ladetechnik

	Energieverbrauch nach VDI-Zyklus [kWh/h]	mittlerer Energieverbrauch geschätzt [kWh/h]	Wirkungsgrad W-Lader mit PzS-Batterie	Wirkungsgrad W-Lader mit E.umwälzung (EUW) und PzS-Batterie	Wirkungsgrad HF-Lader mit E.umwälzung (EUW) und PzS-Batterie	Effizienzverbesserung gegenüber W-Lader	Energieverbrauch gesamt (Fahrzeug und Ladeeinheit) [kWh/h]	Betriebsstunden Fahrzeug/a [h]	Energieverbrauch gesamt / Fahrzeug * Jahr [kWh/a]	KEA Energieverbrauch gesamt/ Fahrzeug * Jahr [MjP]	Einsatz Ladetechnik
EFG 1800, neu	4,6		0,56				8,21	1.200	9.857	112.845	75%
				0,64		12,5%	7,19		8.625	98.739	20%
					0,81	31%	5,68		6.815	78.016	5%
EGV 1400		0,65	0,56				1,16	500	580	6.644	75%
				0,64		12,5%	1,02		508	5.813	20%
					0,81	31%	0,8		401	4.593	5%

- Bei effektiven Effizienzverbesserungen der Fahrzeuge von 2% amortisiert sich ihr Herstellungsaufwand erst nach 36 Jahren.
- Nimmt man dagegen eine durchschnittliche Effizienzverbesserung von 11% in 5 Jahren an, amortisiert sich der Herstellungsaufwand der Fahrzeuge nach 8 Jahren. In diesem Fall amortisiert sich die Fahrzeugherstellung für die meisten Fahrzeugeinsätze während der Lebensdauer des Fahrzeugs. Eine Energieeinsparung aufgrund der höheren Effizienz der Fahrzeuge wird aber erst nach Ablauf von 8 Jahren erzielt.

Eine Übertragung dieses Ergebnisses aus den Modellrechnungen auf die Praxis birgt diverse Probleme:

1. Auswahl repräsentativer Daten: Der Wert für die Effizienzverbesserung der Fahrzeuge von 2% ist möglicherweise sehr viel kleiner als in langfristiger Betrachtung realistisch. Aus einer 1995 von dem Unternehmen durchgeführten Studie ergibt sich eine durchschnittliche Effizienzverbesserung der Fahrzeuge von 11% in 5 Jahren. Die Rechnungen sind insofern als mögliche Szenarien zu verstehen und nicht als Prognosen.
2. Zeitskala: Die angegebenen Werte zu den Effizienzverbesserungen beziehen sich auf unterschiedliche Zeitintervalle: Die Effizienzverbesserung der Fahrzeuge von 2% bezieht sich auf einen Zeitrahmen von 8 Jahren. Der Durchschnittswert von 11% in 5 Jahren stammt aus einer Studie, die Fahrzeuge ebenfalls über einen Zeitraum von 8 Jahren miteinander verglich. Für eine langfristige Betrachtung des Rental ist eine regelmäßig wiederkehrende Effizienzverbesserung von größer als 11% innerhalb der Rental-Vertragslaufzeit von 3-5 Jahren notwendig, um die Amortisation der Neufahrzeugherstellung zu realisieren. Es stellt sich die Frage, ob sich die zukünftigen Effizienzverbesserungen langfristig auf diesem Niveau bewegen können.
3. Datengenauigkeit: Die Angaben zum Energieaufwand der Fahrzeugherstellung sind mit einer vermuteten Unsicherheit von 15-20% behaftet. Durch den multiplikativen Zusammenhang unterliegt auch die Amortisationszeit diesem Intervall.
4. Referenzmodell: Auch in Vergleichsflotten werden mit einer gewissen Rate Neufahrzeuge angeschafft. Rechnet man daher dem Rental im Vergleich nur den darüber hinausgehenden Fahrzeugaustausch zu, ergibt sich eine insgesamt günstigere Bilanz, die hier aufgrund fehlender Daten leider nicht quantifiziert werden kann.
5. Fahrzeugwartung: Ebenso würde sich die Berücksichtigung der energetischen Wartungs- und Reparaturkosten von Altfahrzeugen im Referenzmodell möglicherweise positiv auf die Bilanz des Rental auswirken.
6. Stetigkeit: Die Amortisation der Fahrzeugherstellung kann nur innerhalb der berechneten Zeit erfolgen, wenn das Fahrzeug während dieser Zeit die der Berechnung zugrunde liegende Anzahl an Betriebsstunden im Schnitt im Einsatz ist. Ist das Fahrzeug dagegen nach bspw. 5 Jahren nur noch reduziert im Einsatz, verlängert sich die Amortisationsdauer entsprechend.

7. Fahrerverhalten: Die Angaben zum Energieverbrauch der Fahrersitzgeräte nach VDI-Spiel haben eine Streubreite von $\pm 20\%$, abhängig von der Bereifung, dem Bodenbelag, der Betriebstemperatur und im wesentlichen dem Fahrverhalten des Fahrers.

Aufgrund dieser Sachverhalte ist die energetische Amortisation der Herstellung innerhalb der Lebensdauer für Fahrersitzgeräte ab einer durchschnittlichen Effizienzverbesserung um 10-15% anzunehmen. Ob darüber hinaus eine Netto-Energieeinsparung durch den Einsatz der effizienteren Fahrzeuge während der Lebensdauer der Fahrzeuge realisiert werden kann, ist fragwürdig.

Für Mitgängergeräte ergibt sich eine energetische Amortisation wegen ihres im Vergleich sehr viel geringeren Betriebsstromverbrauchs sowie den wenigen jährlichen Einsatzstunden auch bei einer angenommenen Effizienzsteigerung von 20% erst nach 16 bzw. 29 Jahren. Dies ist ein sehr deutliches Ergebnis, das auch unter Berücksichtigung o.g. Anmerkungen Bestand hat. Der Austausch von Mitgängergeräten nach 3-5 Jahren führt damit zu einem erhöhten Energieaufwand gegenüber dem Referenzmodell.

Die Logistikoftware infolge einer Flottenmaterialflussanalyse führt nach Angaben des Anbieters zu einer Einsparung an gefahrenen Strecken von 15-25%. Dies entspricht einer Einsparung von Betriebsmitteln (Strom, Treibstoffe) in prozentual gleicher Höhe. Für Fahrersitzgeräte, deren jährlicher Energieverbrauch 100.000 MJ p/a erreicht, ist das Einsparpotential durch Logistikoftwareoptimierungen somit beachtlich. Der Einsatz einer neuen Fahrzeugflotte amortisiert sich bei einer durchschnittlichen Einsparung von 20% der Strecken bereits nach 3,5 Jahren.

Mitgängergeräte haben aufgrund ihres geringeren Energieverbrauchs sowie wenigen jährlichen Betriebsstunden (500/a) ein sehr viel geringeres Einsparpotential (jährlicher Energieverbrauch um 6.500 MJp/a). Im Einklang mit der Kostenbetrachtung (hohe Personalkosten durch Fahrersitzgeräte) stehen Fahrersitzgeräte damit auch energetisch im Mittelpunkt einer Flottenmaterialflussanalyse.

Durch den in der Regel im Zusammenhang mit der Flottenmaterialflussanalyse durchgeführten Fahrzeugaustausch steht der o.g. Einsparung ein Energieverbrauch durch die Herstellung neuer Fahrzeuge gegenüber. Tabelle 45 zeigt, dass sich die Fahrzeugherstellung durch die großen Einsparungen der Logistikoftwareoptimierung für Fahrersitzgeräte schnell amortisiert (1-5 Jahre). Die erzielte Energieeinsparung ist jedoch am Größten, wenn nur die Fahrzeuge ausgetauscht werden, deren Austausch sich durch Effizienzverbesserungen des neuen Fahrzeugs amortisiert.

Weiter ist zu beachten, dass das Unternehmen Flottenmaterialflussanalysen als Marketinginstrument nutzt um Kunden Rental-Verträge anzubieten. Die durch Flottenmaterialflussanalysen erzielbaren Energieeinsparungen werden daher zum großen Teil wieder durch den Herstellungsaufwand für Neufahrzeuge kompensiert.

Einsatz effizienter Ladetechnik: Die enormen Effizienzpotenziale moderner Ladetechnik werden (von den Kunden) des Unternehmens weder für Neu- noch für Altfahrzeuge genutzt (zu 95% Nutzung herkömmlicher Ladetechnik).

13.3.9 Interpretation und Umsetzungsmöglichkeiten

13.3.9.1 Erreichtes ökologisches Einsparpotenzial Bewertung Rental vs. Kauf

- + Durch die Flottenmaterialflussanalyse beim Kunden werden Optimierungspotenziale der Logistik in Höhe von 15-25% durch das Unternehmen identifiziert und können mit Beginn eines Rental-Vertrags für den Kunden umgesetzt werden. Die Energieeinsparungen im Betrieb der Flotte liegen in prozentual gleicher Größe wie die erzielte Logistikoftwareoptimierung (=Erschließen von Effizienzpotentialen durch professionellen Betreiber).
- + Effizienzverbesserungen neuer Fahrzeuge werden durch regelmäßigen Fahrzeugaustausch erschlossen (=Erschließen von Effizienzpotentialen durch

professionellen Betreiber).

- 0 Die Rückkopplung zwischen Kunde und dem Unternehmen bei Fahrzeugmängeln ist unabhängig von der Finanzierungsform. Auch gekaufte Fahrzeuge werden oft durch das Unternehmen gewartet. Wenn ein Wartungs- oder Full-Service-Vertrag vorliegt, erfolgt eine direkte Rückkopplung zwischen Service-Techniker und Konstruktion. Liegt kein Wartungsvertrag vor, werden Mängel über Garantie- und Gewährleistung abgewickelt. Um die Full-Service-Kosten niedrig zu halten, werden in Produktentwicklungszirkeln des Flurförderzeugherstellers Verbesserungen an der Fahrzeugkonstruktion hinsichtlich Minimierung der Wartungskosten vorangetrieben (=Optimierung der Fahrzeuge durch Rückkopplung Flottenmanager - Produktentwickler).
- ? Ob sich eine Professionalisierung von Wartung und Reparatur energetisch bemerkbar macht, wurde hier nicht untersucht. Da jedoch auch viele Kunden die Fahrzeuge selbst betreiben und durch das Unternehmen warten lassen, sind die Unterschiede in der Qualität von Wartung und Reparatur im Rental und bei gekauften Fahrzeugen möglicherweise gering.
- 0 Die standardmäßige Verwendung von effizienter Ladetechnik (EUW) für Neu- und Altfahrzeuge ist derzeit wirtschaftlich nicht darstellbar. Daher hat auch das Unternehmen nicht die Möglichkeit, die effizientere, aber teurere Ladetechnik an seine Kunden weiterzugeben.
- 0 Eine lange Lebensdauer der Fahrzeuge wird nicht durch das Unternehmen selbst genutzt, da die Fahrzeuge nach dem Ersteinsatz im Rental an einen Second-hand-Nutzer verkauft werden. Eine energetische Amortisation der Fahrzeuge (Fahrersitzgeräte) wird daher erst nach weiterer Betriebszeit beim Zweitnutzer erreicht. Inwieweit sich die Gesamt-Lebensdauer der Fahrzeuge gegenüber dem Referenzmodell verändert, konnte hier nicht ermittelt werden. Zu der Gesamtlebensdauer der Fahrzeuge nach Rental-Einsatz und ohne Rental-Einsatz gibt es keine detaillierten Daten. Es ist in dem hier betrachteten Fall aber auszuschließen, dass sich die Gesamtlebensdauer der Fahrzeuge durch einen Ersteinsatz im Rental wesentlich *verlängert*, wie es häufig in der Debatte zu umweltfreundlichen Nutzungskonzepten angenommen wird. Auch wenn sich die gesamte Lebensdauer der Fahrzeuge (Erst- und Zweitnutzer zusammengenommen) durch den Ersteinsatz im Rental nicht verkürzen sollte, kann ein positiver Einfluss auf die Lebensdauer nur dem Zweitnutzer zugerechnet werden, der ein Fahrzeug auch noch repariert, wenn es für den Leasinggeber längst unwirtschaftlich geworden ist. Entgegen der Leasing / Dienstleistungs-Debatte ist es hier der Eigentümer der Fahrzeuge, der lange Lebensdauern gewährleisten kann. Der professionelle Flottenmanager, der alle Reparaturkosten weitergeben muss, kann ab einem Alter der Fahrzeuge von 3-5 Jahren nicht mehr wirtschaftlich arbeiten und muss die Fahrzeuge veräußern.
- – Die hohe Fahrzeugfluktuation im Rental (Fahrzeugaustausch alle 3-5 Jahre) verursacht hohe energetische Aufwendungen durch die Fahrzeugherstellung. Für Fahrersitzgeräte kann sich dieser Aufwand durch Energieeinsparungen im Betrieb amortisieren (bei Effizienzverbesserungen der neuen Fahrzeuge > 10-15%); der Fahrzeugaustausch erfolgt aber auch, wenn die Neufahrzeuge keinen Effizienzvorteil gegenüber den ersetzten Fahrzeugen bieten. Für Mitgängergeräte amortisiert sich der Energieverbrauch der Neufahrzeugherstellung wegen des geringen Betriebsverbrauches erst nach mehr als 15-30 Jahren.
- – Die Fahrzeuge bleiben beim Rental nicht über ihren gesamten Lebensweg Eigentum des Unternehmens, sondern werden nach ihrem Rental-Einsatz aufgearbeitet und Second-hand weiterverkauft. Der Betrieb der Fahrzeuge im Rental hat daher keinen Einfluss auf den Produktrücklauf zum Hersteller und auf angepasste Recyclingkonzepte. Entsprechend gibt es im Unternehmen nur wenige Ansätze zur Kreislaufführung von Fahrzeugen und Modulen.

13.3.9.2 Exkurs: Kostenanalyse

Durch die Aussage des Unternehmens, der Fahrzeugbetrieb im Rental sei für sie nach drei bis fünf Jahren nicht mehr wirtschaftlich, wurde für uns eine neue Fragestellung angestoßen. Wie wirken sich unterschiedliche Betriebsökonomien auf die Lebensdauer von Fahrzeugen aus? Zur Illustration des Problemfeldes unterscheiden wir drei Fälle:

- Besitzer von Fahrzeugen, mit alter Flotte, deren Fahrzeuge abgeschrieben sind, also keine Fixkosten mehr verursachen, mit eigener Werkstatt / Lehrwerkstatt. Das Unternehmen nennt als Beispiel eine Firma, die eine Flurförderzeugflotte aus den 50er Jahren betreibt. Ersatzteile für diese Fahrzeuge gibt es nicht mehr. Fällt ein Teil aus, wird ein Ersatzteil in der Lehrwerkstatt eigens hergestellt. Die Strom- bzw. Treibstoffverbrauchsdaten dieser Fahrzeuge dürften relativ hoch sein, sind uns aber nicht bekannt. Nach Aussage des Unternehmens ist der Betrieb dieser Flotte wegen der hohen Reparaturaufwendungen nicht mehr wirtschaftlich. Eine andere Einschätzung ist möglich, wenn man annimmt, dass für die Herstellung eines Ersatzteiles Leerlaufzeiten im Betrieb genutzt werden, oder dass die Ersatzteilherstellung als Praxisbeispiel in der Ausbildung genutzt wird.
- Besitzer von Fahrzeugen ohne eigene Werkstatt, die Reparaturen extern durchführen lassen und dadurch entsprechende Betriebsausgaben haben.
- Leasinggeber von Fahrzeugen des betrachteten Unternehmens, deren Full-Service-Angebot einen Geschäftszweig darstellt, der kostenneutral arbeiten soll (für den Fall, dass der Gewinn durch Fahrzeugabsatz erzielt wird) bzw. der sogar Gewinn bringend arbeiten soll (für den Fall, dass der Schwerpunkt der Geschäftstätigkeit vom Fahrzeugabsatz zum Dienstleistungsangebot hin verschoben werden soll), und der die gesamte Verwaltung, die dafür benötigt wird (Fuhrparkverwaltung, Reparatur- und Wartungskosten, Ersatzfahrzeugstellung), mittragen muss.

Es liegt auf der Hand, dass die Kostenspektren für diese unterschiedlichen Akteure sehr unterschiedlich ausfallen. Im Projektrahmen konnten wir diese Fragen nicht mehr beantworten.

13.3.9.3 Umsetzungsmöglichkeiten / Potenziale

Aus der Analyse ergeben sich für das Flottenmanagement des Flurförderzeugherstellers folgende Potenziale zur weiteren Reduzierung des Energieaufwandes im Flottenbetrieb:

- Begrenzung des Fahrzeugaustausches nach einer Flottenmaterialflussanalyse
- Verlängerung der Nutzungsdauer von Mitgängergeräten im Rental
- Ausbau der Flottenmaterialflussanalyse auch für Nicht-Rental-Kunden
- Fahrerschulungen²²¹: Die Auswirkungen des Fahrverhaltens auf den Stromverbrauch der Fahrersitzgeräte ist erheblich. So streut der Stromverbrauch der Fahrzeuge um 20% abhängig vom Fahrer. Durch Schulungen könnten hier möglicherweise deutliche Energieeinsparungen erzielt werden.

13.3.10 Ausblick

Gemessen am Ziel nachhaltigkeitsoptimierter Nutzungsformen fehlen beim Partnerunternehmen Signale bzw. Motivationen für eine möglichst lange Nutzung von Fahrzeugen in eigener Verantwortung zu nutzen. Stattdessen wird das Rental-Angebot eher als Absatzinstrument genutzt und Fahrzeuge nach 3-5 Jahren durch neue ersetzt, weil der Full-Service danach nicht mehr als ausreichend gewinnbringend betrachtet wird. Das Rental-Angebot des Unternehmens ersetzt damit nicht den Produktabsatz durch eine

²²¹Das Unternehmen führt Fahrerschulungen durch. Bei erfolgreichem Abschluss erhält der Fahrer einen Gabelstaplerschein. Die Schulungen sind allerdings nicht so ausführlich, dass auch Energie sparendes Fahrverhalten geübt wird.

Dienstleistung, sondern nutzt die Dienstleistung als Absatzinstrument. Würde man hingegen auf lange Lebensdauer in eigener Verantwortung abzielen, würden sich aus unserer Sicht folgende Handlungsfelder ergeben:

- Vollkostenrechnung zur Bestimmung der optimalen Vertragslaufzeiten (langer Fahrzeugeinsatz vs. Wartungskosten und Restwert) - Ausloten der ökonomischen Bedingungen für einen Betrieb der Fahrzeuge durch das Unternehmen über die übliche Rental-Dauer von 3-5 Jahren hinaus.
- Weitere Verbesserung der Fahrzeuge in Richtung Robustheit und Wartungsarmut bzw. -freundlichkeit
- Einsatzmanagement der Fahrzeuge in Hinblick auf Optimierung ihrer Lebensdauer.
- Recyclinggerechte Konstruktion: Schaffen von Möglichkeiten zur Wiederverwendung von Fahrzeugteilen in Neufahrzeugen (z.B. Gegengewichte), Entwicklung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für nicht wiederverwendbare Teile von Altfahrzeugen.

Forschungsbedarf: Die energetischen Aufwendungen für die Fahrzeugwartung und die Generalüberholung von Fahrzeugen durch das Unternehmen konnten in dieser Studie nicht ermittelt werden. Sie sind aber wahrscheinlich für die Bestimmung einer energetisch optimalen Lebensdauer der Fahrzeuge bedeutend. Weiter wäre es interessant, den Flottenbetrieb in Verantwortung eines Kunden als Referenzmodell eingehender zu untersuchen. Im Exkurs zur Kostenanalyse wurde zudem angeregt, die unterschiedlichen Betriebsökonomien unterschiedlicher Betreiber von Fahrzeugflotten (Flottenmanager, Kunde) eingehender zu untersuchen.

13.4 Der Gebrauchtmaschinenmarkt im Maschinenbau

13.4.1 Einleitung

Die Nutzungsdauerverlängerung und Nutzungsintensivierung von Produkten ist ein wichtiger Aspekt bei der Erhöhung der Ressourcenproduktivität von Wirtschaftskreisläufen.²²² Für die Nutzungsdauerverlängerung von Geräten spielt die Wieder- bzw. Weiterverwendung von gebrauchten Geräten durch neue Nutzer eine bedeutende Rolle. Ein Faktor für die erfolgreiche Weiternutzung ist das Vorhandensein eines funktionierenden Marktes, auf dem gebrauchte Produkte gehandelt werden können. Der Umfang des Gebrauchtmaschinenmarktes wird allerdings statistisch nicht erfasst. Wir haben daher versucht, den Umfang des Gebrauchtmaschinenhandels in Deutschland abzuschätzen, um eine Diskussionsgrundlage für die Bedeutung dieses Marktsektors zu bekommen.

Die Annäherung an das Thema erfolgt über die Betrachtung des Neumaschinenmarktes sowie über Schätzungen von Experten zum Volumen des Gebrauchtmaschinenmarktes²²³. Zur Verschrottung von Maschinen liegen leider ebenfalls keine Daten vor, so dass auch von daher keine begründete Schätzung vorgenommen werden konnte.

Es hat zwar den Anschein, dass ein Großteil der beweglichen Maschinenbauerzeugnisse im Gebrauchtmarkt gehandelt wird, sei es im Gebrauchtmaschinenmarkt direkt oder z.B. als Motoren im Gebrauchtfahrzeug- oder Gebraucht-schiffemarkt. Vom Gebrauchtmarkt ausgenommen sind i.d.R. allerdings diejenigen Maschinenbauerzeugnisse, die fest in Gebäuden oder Anlagen verbaut sind, die einer sehr schnellen technischen Veraltung unterworfen sind sowie sehr spezielle Maschinen, für die keine weitere Einsatzbereiche gefunden werden

²²²Allerdings müssen auch hier über Lebenszyklusanalysen die Vor- und Nachteile dieser Strategien abgewogen werden (vgl. u.a. Hirschl u. a. 2000 a und b; Schrader 2001).

²²³Für den Neumaschinenmarkt stützen wir uns im Wesentlichen auf Angaben aus den monetären und physischen Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes (StatBuA, 2000 und StatBuA, 2001) und auf die Statistiken des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA) (VDMA, 1999).

können. Weltweit gewinnt der Handel mit Gebrauchtmaschinen an Bedeutung. In manchen Entwicklungsländern liegt der Anteil gebrauchter Maschinen am gesamten Maschinenimport bei 20%. Ein Großteil der ausgedienten Maschinen wird jedoch in den Herkunftsländern selbst weiterverwendet (Greiner et al. 2001, 17). Nach einer Untersuchung, die vom Fachverband des Deutschen Maschinen- und Werkzeug-Großhandels e. V. (FDM) durchgeführt wurde, sind die Umsätze deutscher Maschinenhändler bei gebrauchten Maschinen im Jahr 2000 durchschnittlich um 18 % (1999: 7 %) gestiegen.²²⁴ Als wichtiger Motor für das florierende Geschäft wurde der Export genannt. Sein Anteil betrug im vergangenen Jahr mehr als 50 % (Hess 3/2001).

Der Handel mit Gebrauchtmaschinen macht insbesondere dann Sinn, wenn die Nutzungszeit der Maschine in einem Betrieb wesentlich kleiner ist, als die technische Lebensdauer. Die Lebensdauer von Maschinenbauerzeugnissen variiert jedoch erheblich, genauso wie die dazu vorliegenden Schätzungen verschiedener Experten. Ein Flugzeug wird in den Industrieländern nicht älter als 10 Jahre, ein Schiffsmotor wird nach 12 Jahren ausgetauscht und Maschinen zum Metallformen (z.B. Pressen, Scheren) haben eine lange Lebensdauer von mehr als 20 Jahren²²⁵. So wurde z. B. berichtet, dass eine Metallpresse von 1903 in Russland noch ihren Dienst tut. Dies ist jedoch ein sicher ein Ausreißer. Immerhin ist nach Aussage eines Mitarbeiters von GoIndustry²²⁶ 20 Jahre „kein Alter für eine Maschine“. Noch heute würden Maschinen aus den 50er/60er Jahren für mehrere 100.000 DM verkauft, nachdem die Software modernisiert wurde. Ein Vertreter des Statistischen Bundesamts rechnet für die technische Nutzungsdauer von Maschinen mit einem Durchschnittswert von 10-15 Jahren²²⁷. Dann wird davon ausgegangen, dass die Maschinen nach dieser Nutzungsdauer tatsächlich verschrottet werden. Die kürzesten Produktlebensdauern werden vom Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbauer (VDMA) angegeben. In einer Stellungnahme zum Entwurf der AfA-Tabellen für allgemein verwendbare Anlagegüter des Bundesministeriums der Finanzen wurden folgende technische Lebensdauern angegeben: für CNC-Maschinen und Bearbeitungszentren maximal 8 Jahre, für alle Maschinensparten, die als Sonderanlagen konzipiert sind (wie z.B. Transferstraßen und flexible Fertigungslinien) maximal 5 Jahre und für Bearbeitungsmaschinen mit Laser maximal 6 Jahre (VDMA-Steuern 2000).

Über die geografischen Nachfrageschwerpunkte gehen die Meinungen auseinander. Ein Mitarbeiter der Internetbörse GoIndustry schätzt, dass Gebrauchtmaschinen in erster Linie exportiert werden. Als Hauptabnehmer nennt er die Türkei, Osteuropa, Russland, Malaysia, Frankreich, Deutschland und England. Ein anderer Händler schätzt den Binnenmarkt in Deutschland dagegen auf 25% des Neumarkts für Ausrüstungen²²⁸. Der Binnenmarkt würde damit den Export von Gebrauchtmaschinen übersteigen. Nach seiner Aussage werden gebrauchte Maschinen eher wenig nach England und Amerika (Nord- und Süd-) exportiert wegen der anderen Maße und Spannungen. Greiner et al. nennen als klassische Abnehmerländer für deutsche Gebrauchtmaschinen die südeuropäischen Länder inklusive Türkei sowie Pakistan, Indien und Lateinamerika. Seit Beginn der 1990er Jahre exportierten deutsche Händler aber auch zunehmend in die Mittel- und Osteuropäischen Länder (Greiner et al. 2001, 19). Nach einer Untersuchung des Fachverbandes des Deutschen Maschinen- und Werkzeuggroßhandels e.V. (FDM) betrug der Anteil der Exporte am deutschen Gebrauchtmaschinengeschäft im vergangenen Jahr mehr als 50% (Hess 3/01).

Weltweit verkaufte der Maschinenbau im Jahr 1998 Waren im Wert von > 2.000 Mrd. DM²²⁹

²²⁴Befragt wurden die Mitglieder der Fachgruppe Gebrauchtmaschinen.

²²⁵Herr Müller, Geschäftsführer des Bundesverbandes des Deutschen Exporthandels, telefonische Mitteilung vom 29.1.2001

²²⁶GoIndustry (Auktionshaus für gebrauchte Maschinen und Anlagen und Internetbörse), telefonische Mitteilung vom 18.12.2000

²²⁷Herr Mayer, Statistisches Bundesamt, Abteilung Input-Output-Rechnung, telefonische Mitteilung vom 23.3.2001

²²⁸Mitteilung Herr Hezinger, Hezinger GmbH, Kornwestheim

²²⁹Statistisches Handbuch für den Maschinenbau (VDMA, 2000).

(Tabelle 47). Umgerechnet auf Tonnen entspricht dies einer Masse von 90 Mio. t²³⁰. Zu den größten Produzenten im Maschinenbau gehören die USA mit 36%, Japan mit 23%, Deutschland mit 13% und Italien mit 6% der Weltproduktion. Für die BRD belief sich der Umsatz der Branche 1999 auf 257 Mrd. DM, dies dürfte einer Masse von rechnerisch 12 Mio. t entsprechen.

Tabelle 47_Umsatz Maschinenbau weltweit und regional^{*)}

	1998		1999		1998	1999
Land	Mio. DM	%	Mio. DM	%	Mio. t ⁵⁾	Mio. ^{5)t}
Weltweit	(> 2.000.000)¹⁾				90	
EU	725.000	36,25%			33	
Belgien	12.648	0,63%			0,57	
Dänemark ²⁾	11.542	0,58%			0,52	
Deutschland ³⁾	263.200	13,16%			11,84	
Finnland	19.303	0,97%			0,87	
Frankreich	100.059	5,00%			4,5	
Großbritannien	118.538	5,93%			5,33	
Italien	(116.000)	5,80%			5,22	
Japan	466.531	23,33%			20,99	
Kanada	28.282	1,41%			1,27	
Niederlande	23.929	1,20%			1,08	
Norwegen	(6.700)	0,34%			0,3	
Österreich	(16.000)	1%			0,72	
Schweden	(25.000)	1%			1,13	
Schweiz	(31.700)	2%			1,43	
Spanien	(19.800)	1%			0,89	
USA	(720.000)	36,00%			32,4	
Südkorea	(36.800)	2%			1,66	
Deutschland ⁴⁾	263.937		257.562		11,88	11,59
Norddeutschland	26916	10,20%	25.778	9,77%	1,21	1,16
Schleswig-Holstein	6556	2,48%	6.349	2,41%	0,3	0,29
Hamburg	4727	1,79%	4.320	1,64%	0,21	0,19
Niedersachsen	12.359	4,68%	12.349	4,68%	0,56	0,56
Bremen	2.412	0,91%	1.923	0,73%	0,11	0,09
Mecklenburg-Vorpommern	862	0,33%	837	0,32%	0,04	0,04

²³⁰Die Umrechnung von DM auf Tonnen basiert auf Zahlen für Deutschland für 1995. Die Angabe für die produzierte Menge (Massen) aus der Physischen Input-Output-Rechnung 1995 des Statistischen Bundesamtes (StatBuA 2001) wurde ins Verhältnis gesetzt zu der Produktion in monetären Einheiten aus diesem Jahr (Monetäre Input-Output-Rechnung 1995 (StatBuA 2000)). Das sich ergebende Tonnen – DM- Verhältnis (0,045 kg/DM) wurde mit der monetären Angabe des VDMA für den weltweiten Maschinenumsatz in 1998 multipliziert, um eine Abschätzung der Massen zu erhalten. Das lässt natürlich nur sehr grobe Annäherungen zu. Z.B. können Jahresschwankungen nicht berücksichtigt werden.

^{*)}1) Angaben in Klammern sind Schätzungen des VDMA; ²⁾ ohne Büro- und Informationstechnik; ³⁾ Maschinenbau ohne Waffen und Haushaltsgeräte, inkl. Büro- und Informationstechnik; ⁴⁾ Maschinenbau einschließlich Waffen und Haushaltsgeräte; ⁵⁾ berechnet: siehe vorhergehende Fußnote

Quelle: Statistisches Handbuch für den Maschinenbau (VDMA 2000) und eigene Berechnungen

In Deutschland gehört der Maschinen- und Anlagenbau zu den fünf wichtigsten Branchen. Die Exportorientierung bestimmt das Geschäft: In den letzten Jahren gingen 60 - 70% des Maschinenumsatzes ins Ausland. Der deutsche Maschinenbau führt dabei im Welthandel mit rund 20 % Anteil vor seinen schärfsten Wettbewerbern USA und Japan.

Gemessen an der Anzahl der Unternehmen und nach Beschäftigten ist der Maschinenbau sogar die größte Branche Deutschlands (vgl. Tabelle 48). Es dominieren kleine und mittlere Unternehmen, die häufig auf ihren Spezialgebieten weltweit führend sind (VDMA: Internetseite 3/2001).

Tabelle 48_Deutschland: Branchen des verarbeitenden Gewerbes (VDMA, 3/2001: Zahl der Unternehmen: Daten für 1999; Beschäftigte und Umsatz: Daten für 2000)

Wirtschaftsgruppe	Zahl der Unternehmen	Beschäftigte in Tsd.	Umsatz in Mrd. DM
Maschinenbau	5.787	893	255
Elektrotechnik	3.330	856	292
Straßenfahrzeugbau	942	754	371
Ernährungsgewerbe	5.487	524	208
Chemische Industrie	1.288	452	213
Verarbeitendes Gewerbe	40.296	6.108	2207

1999 hat der deutsche Maschinenbau Waren im Wert von 255 Mrd. DM (11,8 Mio. t) produziert, Maschinenbauerzeugnisse im Wert von 49 Mrd. DM (3,4 Mio. t) wurden importiert und Waren im Wert von 119 (125)²³¹ Mrd. DM (5,2 Mio. t) exportiert²³². Von den inländisch verfügbaren Maschinenbauerzeugnissen entfielen 91 (99) Mrd. DM (3,3 Mio. t) auf Vorleistungen für andere Wirtschaftsbereiche. Hierbei handelte es sich um Komponenten, die weiterverarbeitet bzw. eingebaut werden (z.B. Getriebe, Motoren für Bau von Straßenfahrzeugen), um fertige Maschinen unter der Wertgrenze von 800 DM und um Ersatzteile. Ein Anteil von 44 (54) Mrd. DM (1,3 Mio. t) ging in andere Wirtschaftsbereiche (z.B. Motoren für Schiffe), 47 (45) Mrd. DM (2 Mio. t) gingen in den Maschinenbau selbst. 13 (26) Mrd. DM (0,7 Mio. t) der Erzeugnisse gingen in den privaten Verbrauch (z.B. Haushaltsgeräte), 4 (4,6) Mrd. DM (0,2 Mio. t) in Bauten (z.B. Lüftungs- und Heizungstechnik, Aufzüge und Fahrtreppen) und 77 (85) Mrd. DM (5,8 Mio. t) in Ausrüstungen. Dieser letzte Posten ist derjenige, der hier primär interessiert, da unter „Ausrüstungen“ Investitionsgüter, also ganze Maschinen und Anlagen erfasst werden, die auch später als Gebrauchsmaschinen weiterverkauft werden können. Sie entsprechen 40% des Wertes der inländisch verfügbaren Maschinenbauerzeugnisse und 60% der Masse.

²³¹In den MIOT-Tabellen werden Herstellungs- und Anschaffungspreise angegeben. Hier werden durchgängig Herstellungspreise angegeben; wo ein Wert für Anschaffungspreise verfügbar ist, wird er in Klammern hinter dem Herstellungspreis mit angegeben. Exporte im Wert von 119 (125) Mrd. DM bedeutet also, dass der Herstellungspreis der exportierten Waren 119 Mrd. DM, der Ausfuhrpreis hingegen 125 Mrd. DM betrug. Anschaffungspreise = Herstellungspreise + Handels- und Transportspannen + Gütersteuern - Gütersubventionen.

²³²Dieser Wert für die Exporte ist inkonsistent zu der Exportquote des VDMA aus diesem Jahr (VDMA 3/2001). Hierfür könnten die unterschiedlichen Abgrenzungen des Maschinenbaus von VDMA und Statistischem Bundesamt verantwortlich sein: In der Wirtschaftszweiggliederung von 1993 des Statistischen Bundesamtes wird der Maschinenbau zusammen mit den Bereichen Haushaltsgeräte und Waffen (Munition, Panzer) erfasst. Der VDMA erfasst jedoch den Maschinenbau zusammen mit Büro- und Informationstechnik (bis 12/2000), weist aber i.d.R. auch den Maschinenbau im engeren Sinne, d.h. ohne Büro- und Informationstechnik gesondert aus. Der Anteil der Haushaltsgeräte an der inländischen Produktion von Ausrüstungen liegt bei 15%, ist also sicher nicht zu vernachlässigen.

13.4.2 Der Gebrauchtmaschinenmarkt

Die Spannweite der Preise für Gebrauchtmaschinen und -anlagen variiert erheblich. Auf der einen Seite werden einzelne Computer im Wert von 500 € gehandelt, auf der anderen Seite wechseln ganze Fabriken im Wert von mehreren Millionen DM den Besitzer. GoIndustry handelt Maschinen ab einem Wert von 1.500 €. Der Durchschnittswert pro Verkauf liegt bei 20 - 25.000 Euro. Dieser Wert wird durch den hohen Anteil ganzer Fabriken an den Verkäufen erreicht. Der Händler Hezinger schätzt den Preis einer Gebrauchtmaschine auf 50-60% des Preises einer vergleichbaren Neumaschine. Er setzt sich zusammen aus dem Erlös des Vorbesitzers, dem Aufwand für Herrichtung und Handling der Maschine (Auf- und Abbau, ggf. Schwertransporte, Lagerhaltung) sowie dem Vermittlungsaufwand. Greiner et al. zufolge liegen die Preise für Gebrauchtmaschinen zumeist in der Spanne von 30 - 70% des Preises von Neuanlagen. Je älter die Anlage oder Maschine ist, desto größer sind die Preisabschläge. Der Preis kann dabei bis auf 10% des Neupreises sinken. Für ganz spezielle Maschinen, deren Lieferzeiten äußerst lang sind, können die Gebrauchtmaschinenpreise auch fast den Neupreisen entsprechen. Weiterhin ist für den Preis wichtig, ob die Maschine generalüberholt wurde oder nicht. Eine generalüberholte Maschine mit after-sales-service kostet zwischen 50-75% einer vergleichbaren Neumaschine. Nicht überholte Maschinen kosten dagegen oft weniger als 25% einer vergleichbaren neuen Anlage (Greiner et al. 2001, 23). Der VDMA gibt Verkaufserlöse für ausgemusterte Maschinen von 7 bis 8% der ursprünglichen Anschaffungs- und Herstellungskosten an (VDMA-Steuern 2000).

In den amtlichen Statistiken sind die gesamten Ausrüstungsinvestitionen aufgeführt. Sie umfassen die Käufe neuer Anlagen (einschließlich aller importierten und selbst erstellten Anlagen) sowie die Käufe von importierten gebrauchten Anlagen abzüglich der exportierten gebrauchten Anlagen und verschrotteten Anlagen. Der inländische Gebrauchtmaschinenhandel verändert jedoch den Bestand an Ausrüstungen im Inland nicht. Es handelt sich lediglich um eine Veränderung des Standortes der Anlagen und möglicherweise um eine Verschiebung der Anlagegüter zwischen den einzelnen Branchen. In der Angabe „Ausrüstungen“ ist der inländische Gebrauchthandel daher nicht enthalten.

Während die Gebrauchtmaschinen-Im- und -Exporte in den Angaben zu Im- und Exporten enthalten sind, muss der inländische Gebrauchthandel daher zu dem Wert für Ausrüstungen dazu gerechnet werden. Entsprechende Größenordnungen basieren auf Schätzungen, wie sie in Tabelle 49 dargestellt sind

Tabelle 49_Expertenschätzungen zum Gebrauchtmaschinenmarktvolumen in Deutschland

Quelle	Gesamtmarkt	Export	Import
Hezinger GmbH, Kornwestheim ²³³	21 - 30 Mrd. DM (inländ. Markt für Ausrüstungen)	20%-Anteil an den Maschinenbauexporten	20%-Anteil
BDEX ²³⁴	>30 Mrd. DM = 10% (Gesamtmarkt)	10%-Anteil an den Maschinenbauexporten	
Zwei voneinander unabhängige Quellen mit informeller Stellungnahme	5-8% vom Gesamtmarkt	5-8%- Anteil an den Maschinenbauexporten	5-8%-Anteil an den Maschinenbau-Importen
Greiner et al., 2001, S. 1920	1920 - 30 Mrd. DM (unspezifiziert)	50%-Anteil am Gebrauchtmaschinenhandel	

Ein angemessene Interpretation dieser Zahlen fällt schwer, da die Randbedingungen (zugrunde liegende Maschinenbaudefinition²³⁵ und der geografische Bezug: inländischer deutscher Markt bzw. deutscher Markt plus Export) oft nicht genau angegeben werden.

Unterschiede zwischen den einzelnen Schätzungen zum Volumen des Gebrauchtmaschinengeschäftes beruhen sicher auch auf unterschiedlich hoch angenommenen Preisen für Gebrauchtmaschinen. Für unsere Abschätzungen haben wir einen durchschnittlichen Preis von 50 % der Neumaschine angenommen, obwohl die Spannweite der *Preise für Gebrauchtmaschinen* wie erwähnt erheblich variiert.

13.4.3 Vorgehen bei der Auswertung

Um die Interpretation der verfügbaren Daten und Schätzungen zu vereinfachen, wurde versucht, die aus den Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes (IO-Tabellen 1995, Statistisches Bundesamt 2001) entnommenen Zahlen mit den oben aufgeführten Expertenschätzungen zur Größe des Gebrauchtmaschinenmarktes in einer einheitlichen Darstellung zusammenzuführen. Das Ergebnis sind die Darstellungen für die entsprechenden Geldströme des Neu- und Gebrauchtmaschinenmarkts in Abbildung 86) und für die entsprechenden Mengenströme in Abbildung 87. Die Mengen- bzw. Massenströme wurden wie erwähnt aus den Geldströmen abgeleitet. Als Umrechnungsfaktor wurde das Verhältnis der Masse der neuen Ausrüstungen (5,8 Mio. t) zu ihrem Wert (85 Mrd. DM) berechnet (= 0,068 kg/DM) und durch den zu 50% angenommenen Preis einer Gebrauchtmaschine geteilt (= 0,136 kg/DM). In der Abbildung 86 sind alle Werte in Anschaffungspreisen angegeben, um die Wertströme der Neumaschinen besser mit denen

²³³Geschäftsführer der Hezinger GmbH, Handel mit gebrauchten Anlagen und Fabriken, Kornwestheim, telefonische Mitteilung vom 1.3.2001

²³⁴Geschäftsführer des Bundesverbandes des Deutschen Exporthandels (BDEX), telefonische Mitteilung vom 29.01.2001 und in Hess 3/2001

²³⁵Der Maschinenbau wird ab 1995 in der amtlichen Statistik zusammen mit Waffen und Haushaltsgeräten ohne Büro- und Informationstechnik erfasst (Abteilung 29, „Maschinenbau“). Der VDMA rechnet hier die Waffen und Haushaltsgeräte heraus und kommt so zu dem Begriff „Maschinenbau im engeren Sinn“. Zusammen mit der Abteilung 30 der amtlichen Statistik „Büro- und Informationstechnik“ ergibt sich der Maschinenbau in der Abgrenzung nach der VDMA-Definition (VDMA, 2000, 11). Herr Müller, BDEX, bezieht seine Zahlen auf den Maschinenbau im weitesten Sinn, d.h. inkl. Schiffe und Flugzeuge.

der Gebrauchsmaschinen vergleichen zu können. Wegen der großen Unterschiede bei den Schätzungen wurden nicht einzelne Werte angegeben, sondern jeweils mit einer Spanne minimaler und maximaler Werte gerechnet.

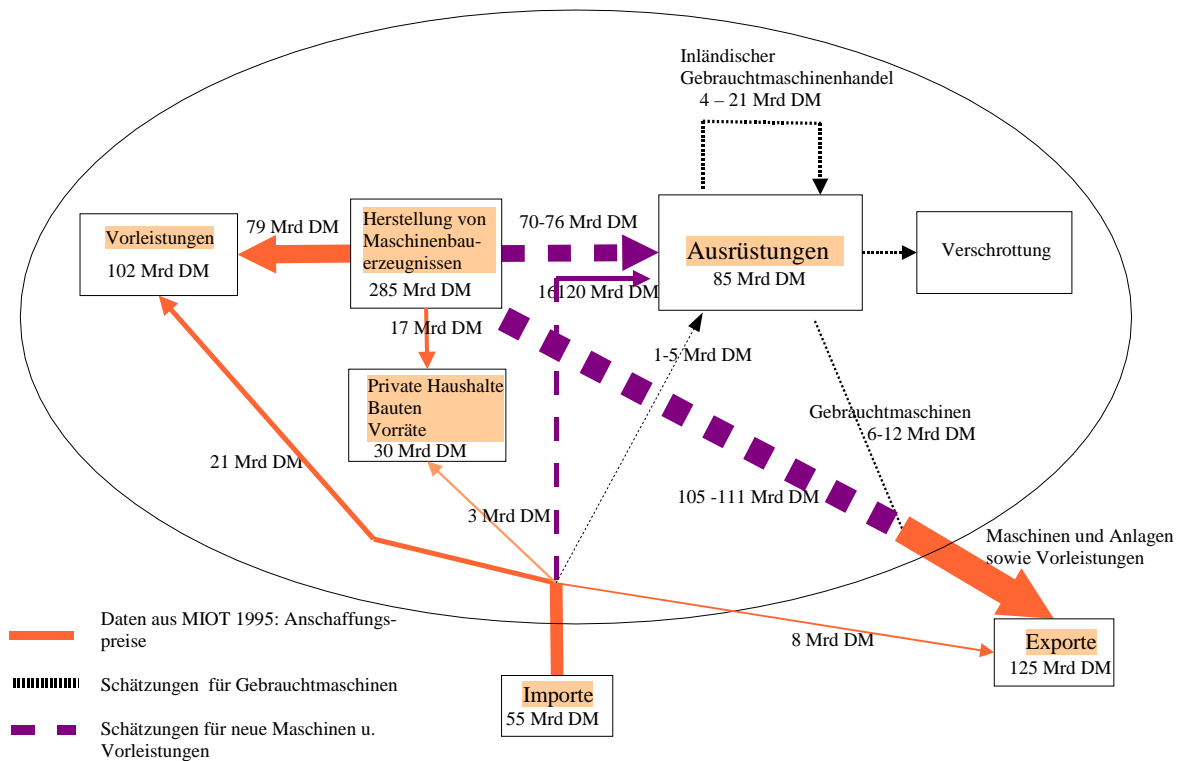


Abbildung 84_ Geldwerte des Gebrauchsmaschinenhandels in Deutschland (1995)

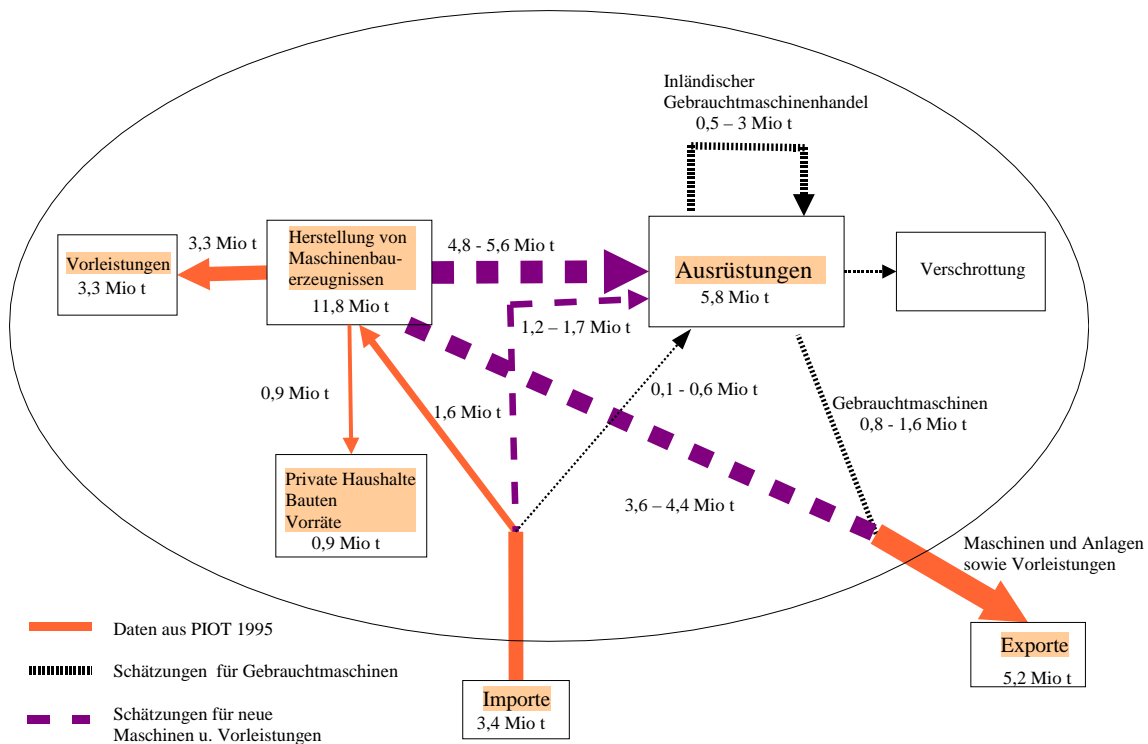


Abbildung 85_Massenströme des Gebrauchsmaschinenhandels in Deutschland (1995)

Die Exporte setzten sich zusammen aus Exporten von neuen und gebrauchten Maschinen und Anlagen und aus Vorleistungen (Maschinenbaukomponenten und Maschinen unterhalb der Wertgrenze von 800 DM). Die Gebrauchtmashinenexporte wurden in der Rechnung auf 6 – 12 Mrd. DM geschätzt, das entspricht einem Anteil von 5 - 10% an den gesamten Exporten. Die Importe setzen sich zusammen aus Importen von neuen und gebrauchten Maschinen, Vorleistungen und Haushaltsgeräten. Die Gebrauchtmashinenimporte wurden auf 1 - 5 Mrd. DM geschätzt, dies entspricht einem Anteil von 5 – 35% an den importierten Maschinen.

Für die Verschrottung liegen keine Werte vor. Rein rechnerisch bedeutet ein Mengenabfluss in die Verschrottung eine Vergrößerung der Zuflüsse zu den Ausrüstungen, d.h. eine Vergrößerung der Neumaschinenzugänge (aus inländischer Produktion oder aus Importen) und/oder eine Vergrößerung der Gebrauchtmashinenzugänge aus Importen. Auch bei monetär geringen Abgängen in die Verschrottung (Schrottwert der Anlagen) ist in Mengeneinheiten eher ein großer Wert für die Verschrottung zu erwarten.

13.4.3.1 Auswertung der Daten

Der inländische Materialstrom für Gebrauchtmashinen von 0,5-3 Mio. t entspricht einem Anteil von 10-50% an den inländisch produzierten Neumaschinen. Der untere Wert (0,5 Mio. t) entspricht der unteren Schätzung von monetär 5% der neuen Ausrüstungen, der obere Wert der oberen Schätzung von monetär 25%.

Es kommen netto 5,8 Mio. Tonnen (StatBuA, 2001) an Ausrüstungen zur Volkswirtschaft hinzu, erhöhen also um diesen Wert den inländischen Bestand. Dieser setzt sich zusammen aus zufließenden neuen Anlagen aus dem Inland oder aus Importen (6 - 6,8 Mio. Tonnen (berechnet)), aus importierten Gebrauchtmashinen (0,1 - 0,6 Mio. Tonnen; Umrechnung aus monetärer Schätzung) und den abgehenden Gebrauchtmashinen durch Exporte (0,8 - 1,6 Mio. Tonnen; Umrechnung aus monetärer Schätzung).

Folgt man einer Untersuchung des Fachverbandes des Deutschen Maschinen- und Werkzeuggroßhandels e.V. (FDM)²³⁶ und den Ergebnissen von Greiner et al., liegt der Anteil der Exporte am Gebrauchtmashinengeschäft bei über 50%. Um dieser Schätzung zu entsprechen, müsste bei festem Wert für die Exporte der Wert für den inländischen Gebrauchtmashinenhandel um 0,5-1,5 Mio. t liegen. Daraus ergibt sich ein Gesamtvolumen des Gebrauchtmashinenmarktes um 1,4–3,7 Mio. t. Dies entspricht einem Anteil am gesamten Neumaschinenmarkt von 13 – 36%. Das bedeutet, dass jede achte bzw. jede dritte Neumaschine eine alte ersetzt, die dann in den Gebrauchtmashinenmarkt geht.

Von entscheidender Bedeutung für die Berechnung der Relevanz des Gebrauchtmashinenmarktes in Masseneinheiten ist die Annahme des relativen Preises einer Gebrauchtmashine bei der Umrechnung der Wert- in Massenströme. Nimmt man einen niedrigeren Verkaufspreis an, von z.B. 30 %, so ergibt sich eine höhere Massenrelevanz des Gebrauchtmashinenmarktes von in diesem Fall 2,3 – 6,2 Mio. t (statt 1,4 - 3,7 Mio. t); bei einem Preis von z.B. 70% ergibt sich ein Volumen von 1 - 2,6 Mio. t.

13.4.4 Fazit zur Analyse des Gebrauchtmashinenmarkts

Zahlen zum Volumen des Gebrauchtmashinenmarktes sind nur aus Schätzungen von Branchen Kennern zu beziehen. Diese sind sich nicht darin einig, ob der Gebrauchtmashinenmarkt ein bedeutender boomender Markt ist oder in seiner Größe vernachlässigbar. Wir haben Mittelwerte der Expertenschätzungen mit dem Neumaschinenmarkt verglichen und die Wertströme (Preise) über Informationen aus den Physischen Input-Output-Rechnungen 1995 des Statistischen Bundesamtes (StatBuA, 2001) und Annahmen über die Preise von Gebrauchtmashinen in Massenströme (Tonnen) umgerechnet. Durch die relativ niedrigeren

²³⁶Hess 3/01

Preise für Gebrauchtmachines resultierten rechnerisch die relativ großen Massenströme des Gebrauchtmachinesmarktes. Wird die Bedeutung des Gebrauchtmachinesmarktes in monetären Einheiten auf 5 – 35 % des Neumaschinenmarktes geschätzt, so ergibt sich eine Bedeutung des Gebrauchtmachinesmarktes in Masseneinheiten von vorsichtig geschätzt 15 – 50 % des Neumaschinenmarktes. Unter dem Aspekt der Ressourcennutzung ist der Gebrauchtmachinesmarkt daher in unseren Augen ein sehr bedeutender Markt.

Es war sehr schwierig, überhaupt Zahlen zum Gebrauchtmachinesmarkt zu bekommen. Andererseits wurde mehrfach Interesse an unseren Ergebnissen geäußert. Es besteht also eine hohe Intransparenz auf diesem Markt im Hinblick auf die zurechenbaren Geld- und erst Recht Massenströme. Es ist zu vermuten, dass große Händler von Gebrauchtmachines eigene Marktanalysen haben durchführen lassen, deren Ergebnisse allerdings nicht öffentlich zugänglich sind.

13.5 Zusammenfassung und Ausblick zu Produktgestaltungs- und Produktnutzungsstrategien

Produktgestaltungs- und Produktnutzungsstrategien sind anspruchsvolle win-win-Beispiele des Stoffstrommanagements. Das Produkt und der Nutzen des Produkts sind Kernelemente des Wirtschaftens. Für Unternehmen ist es daher besonders heikel, in diesem Bereich mit externen Partnern zusammenzuarbeiten. Unsere Versuche, auch Unternehmenskooperationen in diesem Bereich zu initiieren, die nicht nur bilateral zwischen Forschungsteam und Unternehmen verlaufen, sondern weitere Unternehmen derselben Branche einbeziehen, waren nicht von Erfolg gekrönt. Das Thema ist einfach zu sensibel. Externen wird nicht gerne Einblick in die Produktstrategien gegeben, und erst Recht werden externen Partnern (oder gar Wettbewerbern keine Einflussmöglichkeit in diesem Bereich eingeräumt. Kooperationen in der Abfallwirtschaft sind im Vergleich dazu vergleichsweise unkompliziert.

Auf der anderen Seite bieten gerade die Produktgestaltung und Produktnutzung mit die weitreichendsten Potenziale für nachhaltigkeitsorientierte Optimierungen. Insofern sind die entsprechenden Bemühungen gut zu begründen, auch wenn vorzeigbare gemeinsame praktische Entwicklungen letztendlich ausblieben. Immerhin dürfte zumindest den erarbeiteten Orientierungen, insbesondere den erarbeiteten Leitlinien zur nachhaltigkeitsoptimierten Modularisierung, in Zukunft ein gewisse praktische Relevanz zukommen.

Auch die Überprüfung weit verbreiteter (Vor)Urteile zur nachhaltigkeitsbezogenen Relevanz von Flottenmanagement oder einer Verlängerung der Produktnutzungsdauer einschließlich des Gebrauchtmachinesmarkts hat zur Klärung von Grundlagen beigetragen, an denen in Zukunft angeknüpft werden kann.

Zu den wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen gehört die Erkenntnis, dass gerade die Modularisierung von Produkten sehr gut geeignet ist, um - auf einer eher technischen Ebene - produzierenden Unternehmen eine Unterstützung für Schritte hin zu einem mehr nachhaltigen Wirtschaftens zu geben. Die bekannte Methode „Modularisierung“ ist bei den Unternehmen bekannt für eine flexiblere und kostengünstigere Produktion von komplexen Produkten und breiten Produktpaletten. Dennoch wird sie gerade von kleineren Unternehmen nur vereinzelt eingesetzt, da es typische (organisatorische) Hemmungen zur Umstellung der Konstruktion und Produktion gibt. Ein Impuls von außen mit entsprechendem know-how kann als Aktivierungsenergie in diesen Fällen hilfreich sein, um diesen Innovationsprozess in Gang zu bringen. Gleichzeitig ist die Modularisierung von Produkten hervorragend geeignet, um die Wartung und Modernisierung kostengünstig durchführen zu können. Dies kann natürlich nur dann für das Unternehmen interessant sein, wenn ihm gleichzeitig die Möglichkeit eröffnet wird, auf der Basis der verlängerten Lebenszeit seiner Produkte auch eine verbesserte Wertschöpfung zu erzielen.

Dies leitet über zu dem zweiten oben genannten Bereich unserer eher theoretischen Arbeiten. Nämlich zu den öko-effizienten Dienstleistungen und der Frage, wie eine Transformation der Wirtschaft in diese Richtung gelingen kann. Wir haben uns kritisch mit der ökologischen Vorteilhaftigkeit des Leasing-Konzepts auseinandergesetzt. Wir mussten bei der Untersuchung feststellen, dass nur bestimmte Leasingformen, insbesondere das Hersteller-Leasing, die gewünschten Potenziale eröffnet. Unsere Schlussfolgerungen sind daher, dass eine veränderte Vertragsgestaltung zwar einen positiven Effekt auf ein nachhaltigeres Wirtschaften haben kann, dass diese aber weder notwendig noch hinreichend für eine Transformation ist. Vielmehr müssen auch andere Aspekte einfließen, dazu gehören in erster Linie die Innovationsfähigkeit des Unternehmens insbesondere im organisatorischen Bereich, ein starkes Leitbild nachhaltigen Wirtschaftens und regulative Rahmenbedingungen.

Auf der praktischen Ebene im Dialog und in der Zusammenarbeit mit Unternehmen haben wir die Regeln der Modularisierung an einem Beispiel durchgespielt und die energetischen Effekte einer öko-effizienten Dienstleistung bilanziert. Weiterhin haben wir, um einen Überblick über den Umfang des Gebrauchtmotorenmarktes zu bekommen, in einer aufwändigen Recherche und in zahlreichen Expertenbefragungen die Geld- und Massenströme des Marktes dargestellt. Diese Recherche zeigte vor allem die schlechte Datenlage und das große Interesse der in dem Markt agierenden Akteure an unseren Untersuchungen. Trotz aller Bemühungen konnten wir das Vertrauensintervall der Ergebnisse nicht weiter reduzieren, so dass wir bei einer vorsichtigen Schätzung von einem wertmäßigen Volumen von 5–35 % des Neumaschinenmarktes ausgehen müssen.

Auf der praktischen Ebene zur Produktgestaltung wurden die von uns erarbeiteten Regeln einer nachhaltigkeitsorientierten Modularisierung auf die Konstruktion eines Ventils in der Nahrungs- und Genussmittelindustrie beispielhaft angewendet. Im engen Dialog mit den Partnern im Unternehmen wurden verschiedene konstruktive Varianten entwickelt, die den Bedingungen einer nachhaltigkeitsorientierten Konstruktion entsprechen. Dieses Beispiel zeigt auch die große Bandbreite von Aktivitäten in unserem Projekt: bei der Erprobung von Elementen und Zugängen in einer leitbildgeprägter Prozessstrategie (vgl. Kapitel 4). Die erfolgreiche Anwendung der Modularisierungsregeln zeigt zumindest die Praktikabilität unseres Vorgehens und die Möglichkeit, die Kluft zwischen derartigen kleinteiligen Optimierungen und den sehr weit reichenden Nachhaltigkeitszielen zumindest ansatzweise zu überbrücken. Immerhin müssen Konstrukteure hohe und teilweise widersprüchliche Anforderungen in den Konstruktionen verwirklichen. Die Anforderungen für eine nachhaltigkeitsorientierte Konstruktion müssen, wie alle anderen Anforderungen auch, von der Unternehmensspitze unterstützt werden. Auch die Geschäftsführung und/oder die Grundsatzabteilung (und ggf. weitere, wie das Marketing etc.) müssen überzeugt sein, dass mit der Modularisierung Märkte erobert bzw. gesichert werden können, nicht zuletzt indem neben dem Verkauf von Produkten auch öko-effiziente Dienstleistungen angeboten werden.

Derartige Paradigmenwechsel in der „Verkaufsstrategie“ können nicht im Rahmen eines Forschungsprojekts angestoßen werden. Die Überprüfung der Energieeinsparpotentiale durch Flottenmanagement konnte schon an einem vorfindbaren Prozess zum Paradigmenwechsel ansetzen. Die Zusammenarbeit mit den Abteilungen zum Materialflussmanagement und Flottenmanagement war möglich, weil diese Abteilung selbst schon bestrebt waren, ihr Angebot an Dienstleistungen zu erweitern. Dieses Bemühen hatte aber – wie alle Innovationen – mit den Systemträgheiten im Unternehmen zu kämpfen. Unser Ziel war es, durch eine Energiebilanz den Bemühungen dieser Abteilungen zusätzliche wissenschaftlich gestützte Argumente an die Hand zu geben. Positiver Nebeneffekt war dabei ein weiter reichender Dialog über nachhaltiges Wirtschaften sowie die Überprüfung, ob die „öko-effiziente“ Dienstleistung tatsächlich die auf sie gerichteten Erwartungen tatsächlich zu erfüllen in der Lage ist. Auch wenn nur der kumulierte Energieaufwand (KEA) untersucht werden konnte. Lässt sich als Ergebnis dieser Analyse festhalten, dass durch ein besseres Management der innerbetrieblichen Logistik durchaus ökologische Vorteile dann erzielt werden können, wenn diese Dienstleistung nicht allein und auch nicht vorwiegend als Absatzinstrument für neue Fahrzeuge verstanden wird. Mit

unseren Annahmen einer mittleren Nutzung amortisiert sich der Energieaufwand zur Herstellung eines neuen Gabelstaplers mit einer Effizienzverbesserung von 10 % in etwa 10 Jahren. Aber auch hier wären flankierende Maßnahmen sinnvoll, die sich z.B. auf die Verlängerung der Nutzungsdauer im Rental, den Ausbau der Dienstleistung „Optimierung der innerbetrieblichen Logistik“ auch ohne Rental und auf spezielle Fahrerschulungen beziehen.

Es zeigte sich, wie bei allen unseren Untersuchungen, dass nachhaltiges Wirtschaften nicht durch einzelne Maßnahmen oder Strategien zu erzielen ist, sondern dass ein ganzes Bündel kontextabhängiger Initiativen notwendig ist, damit beim Sich-Öffnen von ‚Gelegenheitsfenstern‘ (windows of opportunity) die richtigen Impulse gesetzt werden können, die von der vorbereiteten Struktur dann auch umgesetzt werden können. Produktgestaltung- und Produktnutzungsstrategien bieten dafür weit reichende Ansatzmöglichkeiten und sind zugleich große Herausforderungen.

14 Fazit

14.1 Projektdesign

Das Projekt zeichnete sich im Wesentlichen durch zwei Zugänge aus, durch einen stofflichen und einen akteursorientierten. In dem einen Zugang standen die Metalle mit ihren Begleit- und Nebenstoffströmen im Zentrum. Im akteursorientierten Zugang waren es die Akteure der Metallwirtschaft, wobei der Fokus auf den metallbasierten Innovationssystemen in der Region Hamburg lag.

Zu den wichtigsten Nachhaltigkeitsdefiziten, mit denen sich das Projekt auseinandersetzte, gehörte ein nachhaltigerer Umgang mit der nicht-regenerativen Ressource Metalle. Im Zentrum standen dabei die Vermeidung von nicht-recyclierbaren metallischen Abfällen, die Vermeidung der Anreicherung von Störstoffen in den Metallkreisläufen sowie die Reduzierung problematischer Metallnebenstoffströme, insbesondere der Kühlschmierstoffe. Im akteursorientierten Zugang standen die regionalen Innovationssysteme der Hamburger Metallwirtschaft im Fokus. Die räumliche Nähe, die Möglichkeiten zur direkten Kommunikation – so eine der Grundthesen – bilden die Grundlage für den Aufbau von Vertrauensbeziehungen und für die Verständigung über Leitbilder im Rahmen des Nachhaltigkeitsdiskurses. Die Funktionsfähigkeit derartiger regionaler Innovationsnetzwerke gehört zu den fundamentalen Voraussetzungen jeglicher Nachhaltigkeitsstrategie in Kooperation mit Unternehmen. Die Innovationsfähigkeit ist eine Grundvoraussetzung für den Umbau unseres Wirtschaftens in Richtung auf mehr Nachhaltigkeit. Erst auf dieser Basis können auch die anderen wesentlichen Nachhaltigkeitsziele verfolgt werden, die Verbesserung der ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit sowie die Wahrnehmung der sozialen und ökologischen Verantwortung durch die regionalen Unternehmen der Metallwirtschaft entlang der ihnen vor- und nach gelagerten Wertschöpfungsketten.

14.2 Projektergebnisse

Zu den wichtigsten Projektergebnissen gehören:

- a) Die Konzeption eines integrativen Zugangs zum Nachhaltigkeitsziel, bei dem aufbauend auf der Unterscheidung zwischen zwei Typen von Nachhaltigkeitsproblemen (akut, wahrnehmbar, regional und im Prinzip reversibel vs. schleichend, global, langfristig und wenn wahrnehmbar schon nicht mehr reversibel) zwei Hauptansätze für die Nachhaltigkeitsforschung skizziert wurden (projektorientiert, einmischend vs. analytisch, modellierend, an Tragekapazitäten orientiert) sowie zwei Typen von Nachhaltigkeitsstrategien mit ihren je unterschiedlichen Zielbestimmungen (Prozessmodell mit offensiver Zielbestimmung im Sinne eines ‚Guten Lebens‘ und Steuerungsmodell mit defensiver Zielbestimmung im Sinne eines ‚Weges in die Zukunft unter Vermeidung grundlegender Systemzusammenbrüche‘).
- b) Die Präzisierung der Zielbestimmungen und der Probleme eines nachhaltigeren Umgangs mit der nicht-regenerierbaren Ressource Metalle. Bei den Metallen, die sich zumindest im Prinzip ohne Qualitätsverluste beliebig oft recyceln lassen, steht dabei die Sicherung dieser alles andere als einfachen ‚Leistung‘ einer hochwertigen Kreislaufführung im Zentrum. Es geht um die Vermeidung dissipativer Verluste (Emissionen, Korrosion, Abfälle) und um den Qualitätserhalt in den Metallkreisläufen (Vermeidung der Akkumulation von Störstoffen, Getrennt-Führung von Legierungen).
- c) Ein Kriterienraster zur Bewertung von Projekten und Innovationen mit Blick auf die Gesamtzielrichtung Nachhaltigkeit und in diesem Zusammenhang insbesondere die Entwicklung und Erprobung der Methode der ‚Entropiebilanzierung‘. Entropiebilanzen

ergänzen die im energetischen und stofflichen Bereich dominierende Bewertungsmethode der Ökobilanzierung. Ökobilanzen konzentrieren sich auf die Größenordnungen von Stoff- und Energieströmen, sind also durchflussorientiert. Nur über Entropiebilanzen lässt sich der ‚Verbrauch‘ (die Entwertung) von Ressourcen angemessen analysieren und definieren.

- d) Ein grobes Modell der nationalen Stahlkreisläufe, mit dessen Hilfe die Problematik ansteigender Störstoffgehalte unter verschiedenen Rahmenbedingungen ‚simuliert‘ werden kann. Mit Hilfe dieses Modells konnten auf einem vom Projekt veranstalteten Workshop zum Thema ‚Kupfer als Störstoff im Stahlkreislauf‘ entscheidende Impulse vermittelt werden für die Akteure in der Wertschöpfungskette, angefangen von der primären Stahlproduktion über die Automobilherstellung, -nutzung, Demontage, Schredder, Schrotthandel bis zur Sekundärstahlerzeugung. Da derzeit keine Möglichkeit in Sicht ist, den Störstoff Kupfer nachträglich aus der Stahlschmelze zu entfernen, und da jeder einzelne Akteur in der Kette allein überfordert ist, bleibt nur die Möglichkeit eines Wertschöpfungsketten übergreifenden Lösungskonzepts.
- e) In Kooperation mit Unternehmen erarbeitete Leitlinien einer nachhaltigkeitsorientierten Modularisierungsstrategie für die Gestaltung von Produkten des Maschinenbaus. Da Modularisierung derzeit ohnehin von vielen Unternehmen als Strategie verfolgt wird, um die weiter zunehmende Modellvielfalt zu beherrschen, scheint sich hier ein ‚Gelegenheitsfenster‘ zu öffnen, in dem sich zwei Gestaltungsprinzipien verbinden lassen (einerseits Beherrschung der Modellvielfalt andererseits Reparierbarkeit und Modernisierbarkeit im Sinne der Verbesserung der Ressourceneffizienz). In diesen Zusammenhang der Verbesserung der Ressourceneffizienz durch Nutzungsintensivierung bzw. Nutzungsverlängerung von Produkten gehört auch eine Abschätzung der monetären und Ressourcenrelevanz des Handels mit Gebrauchsmaschinen.
- f) Eine ganze Reihe von Lehren und Schlussfolgerungen aus der praktischen Erprobung von Stoffstrommanagementansätzen. Hierzu gehört die Einsicht, dass Stoffstrommanagement nicht als ‚Management von Stoffströmen‘ betrieben werden kann. Schneidewind hat dies schon klar und deutlich formuliert als Ergebnis eines auf die ‚textile Kette‘ orientierten Stoffstrommanagementprojekts: „Die symbolische Software lenkt die substanzielle Hardware“²³⁷. Stoffstrommanagement ist ganz wesentlich ‚Management‘ von Akteuren, Akteursbeziehungen sowie Kommunikationsformen und Kommunikationsinhalten, insbesondere auch das ‚Management‘ von ‚Symbolen‘ und ‚Leitbildern‘. Auch wenn mit Blick auf die oben unterschiedenen Strategietypen der defensiven Steuerungsstrategie der Vorzug zu geben ist, weil sie sich auf die wirklich gravierenden, schleichenden und oft globalen Langfristprobleme konzentriert, in der praktischen Kooperation (nicht nur) mit Unternehmen setzt sich immer (zumindest zunächst) die an akuten, kurzfristigen, unmittelbar wahrnehmbaren und eher lokalen bis regionalen Problemen orientierte Prozessstrategie durch. Zugänge zu Lösungen für den langfristigen und schleichenden Problemtyp lassen sich unseren Erfahrungen zufolge auf zwei Wegen eröffnen. Zum einen kann auf der Basis der am kurzfristigen Problemtyp schon gemachten positiven gemeinsamen Erfahrungen der Blick auf längere Zeithorizonte gelenkt werden. Dies war z. B. in den beiden Teilprojekten ‚Kupfer als Störstoff im Stahl‘ der Fall – wobei hier, wie erwähnt, die Modellierung und Simulation eine wichtige Vermittlerrolle einnahm – sowie im Teilprojekt zur Modularisierung in der Produktgestaltung. Der zweite Zugang erfolgte eher ‚top down‘, sozusagen ausgehend von der von Anfang an ‚symbolischen Interaktion‘ über Nachhaltigkeit. Die Initiierung zweier ‚Foren‘ aus dem Projektzusammenhang heraus entfaltete weit reichende Wirkungen in der Region, welche so zunächst weder absehbar noch ‚geplant‘ waren. Die Ringvorlesung

²³⁷ Schneidewind; Goldbach; Fischer; Seuring 2003, S. 15

„Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg“, an der wesentliche Akteure aus der regionalen Metallwirtschaft, aber auch aus Interessensgruppen, aus der Politik und aus Behörden regelmäßig beteiligt waren, entwickelte sich zur regionalen Plattform für weit reichende Debatten über die Ziele und Problemdimensionen einer nachhaltigen Metallwirtschaft, aber auch über die Handlungsmöglichkeiten und Handlungsrestriktionen (nicht nur) der regionalen (Metall)Wirtschaft. Gleichzeitig entwickelte sich die Debatte und Verständigungsbereitschaft in dem hochrangig besetzten Beirat unseres Forschungsprojekts derart intensiv, dass sich die Mitglieder des Projektbeirats nach Projektende als „Forum Nachhaltiges Wirtschaften Hamburg“ zusammengeschlossen haben. Dieses bei der Handelskammer Hamburg angesiedelte Forum arbeitet weiter und organisiert im Wesentlichen öffentliche Veranstaltungen, auf denen Hamburger Unternehmen „best practice“ Beispiele vorstellen auf ihrem Weg zu mehr nachhaltigem Wirtschaften.

- g) Zu den praktischen Erfolgen des Projekts gehört ohne Zweifel die Umstellung mehrerer Bearbeitungszentren in einem Partnerunternehmen auf die Minimalmengenschmierung bei der spanenden Metallbearbeitung. Diese Umstellung führte zu einer Reduzierung der Kühlschmierstoffumsätze um ungefähr den Faktor 1000 und ist insofern ein schönes Beispiel für praktische Erfolgsmöglichkeiten im Rahmen der Effizienzstrategie. In diesen Zusammenhang der Effizienzsteigerung gehört darüber hinaus auch die Erarbeitung eines einfachen EDV-Tools für das betriebliche Materialflusscontrolling. Ohne vorzeigbare praktische Erfolge blieben aus ganz unterschiedlichen Gründen drei weitere Teilprojekte. Angelehnt an das Konzept einer „industriellen Symbiose“, bei dem der Abfall des einen Unternehmens als Rohstoff in das nächste Unternehmen eingeht, hatten wir nach einer regionalen Verwertungsmöglichkeit für Strahlmittelabfälle gesucht. Faszinierend an diesem Teilprojekt war dann, dass sich eine Verwertungsmöglichkeit eröffnete, bei der nicht nur das Metall in diesem Abfall hätte wiederverwertet werden können, sondern gerade auch die spezifische Form in der es vorlag, als Pulver. Es konnte gezeigt werden, dass sich diese Strahlmittelabfälle in der Pulvermetallurgie eines Herstellers von Reibbelägen der Region einsetzen lassen. Doch der Beweis der technischen Realisierbarkeit – und auch die nicht zu unterschätzende Möglichkeit für ein in der regionalen Öffentlichkeit vorzeigbares Projekt – reichte offenbar für das abnehmende Unternehmen als Motivation allein nicht aus, um auf Abfälle als (Teil)Rohstoffe umzusteigen. Die Zusammenarbeit mit einem regionalen Unternehmen, das sich auf die hochwertige Verwertung von Schleifschlämmen spezialisiert hatte, musste aufgrund von Konkurs dieses Unternehmens abgebrochen werden. Bis dahin konnten immerhin die Stoff- und Energieströme im Unternehmen weitgehend bilanziert und modelliert werden. Die geplante, darauf aufbauende Bewertung und ein Vergleich dieses Verfahrens mit anderen Lösungen kam dann aber leider nicht mehr zustande. In einem dritten Teilprojekt schob sich eine für Nachhaltigkeitsprojekte nicht untypische Problematik in den Vordergrund, nämlich einerseits die Zwickmühle zwischen betrieblicher Geheimhaltung und überbetrieblicher Kooperation und andererseits die divergierenden Zeithorizonte zwischen den meist kurzen Projektlaufzeiten und den meist längerfristig angelegten Innovationsprozessen im Unternehmen, insbesondere, wenn diese den Produktbereich betreffen. So konnten zwar die Entscheidungsgrundlagen für den Bereich Produktstrategien im Partnerunternehmen verbessert werden durch eine Bilanzierung der Energieeinsparpotentiale, die mit verschiedenen Strategien im Bereich des Flottenmanagements und Produktleasings verbunden sind. Definitive strategische Entscheidungen in die eine oder die andere Richtung wurden vom Unternehmen während der Projektlaufzeit aber nicht mehr getroffen. Dasselbe gilt für die konkrete Anwendung der schon erwähnten Leitlinien für eine am Nachhaltigkeitsziel orientierte Modularisierung bei der Produktgestaltung.

14.3 Ausblick

Das Projekt kann mit seinem erst in der Projektlaufzeit richtig entwickelten Verständnis von ‚Stoffstrommanagement‘ eingeordnet werden in einen mehrfachen Perspektivwechsel zwischen Qualitäten und Quantitäten, der den wissenschaftlichen und praktischen Umgang mit Stoffen unter den Gesichtspunkten von Gesundheits-, Umweltschutz und Nachhaltigkeit in den vergangenen Jahrzehnten bestimmte. Auf die qualitätsbezogene (öko)toxikologische Debatte über Schadstoffe, folgte Mitte der 80er Jahre die quantitätsbestimmte Sichtweise auf Stoffe, die erst durch große Mengenumsätze zu großen Problemen führen (CO₂, Nährstoffe, Wasser, Sand, Kies usw.). Auf die Debatte über die Reichweite von Ressourcen im Anschluss an den Bericht des ‚Club of Rome‘ folgte die Debatte über die Begrenztheit der Aufnahmekapazitäten (Tragekapazität) von Senken. Nachdem die Aufmerksamkeit zunächst den Schnittstellen zwischen Technosphäre und Ökosphäre galt, und insofern Lösungen eher in der Umweltpolitik (bezogen auf Emissionen und Abfälle) und in der Ressourcenpolitik gesucht wurden, wendet sich der Blick jetzt zunehmend auf den Umgang mit Stoffen und Energien in der Technosphäre. Damit ist ein weiterer Perspektivwechsel zwischen quantitativer und qualitativer Betrachtung verbunden, der auch das vorliegende Projekt bestimmte: Die **Hinwendung zur qualitativen Bewertung des Umgangs mit Stoffen und Energien in der Technosphäre** und in diesem Zusammenhang auch die Hinwendung zu dem, was wir umgangssprachlich als ‚Verbrauch‘ bezeichnen. Für diesen letzteren Aspekt wurde mit der Entropiebilanzierung im Rahmen des Projekts ein viel versprechender methodischer Ansatz entwickelt. Aber es geht um mehr. Es geht um die ‚Hochwertigkeit‘ der Ressourcennutzung, es geht um die Hochwertigkeit von Recyclingprozessen, und es geht weit darüber hinaus um die nachhaltige Gestaltung von industriellen Systemen, Prozessen und Produkten nach dem Vorbild von Ökosystemen. Die belebte Natur macht es uns vor, wie allein auf der Basis des unerschöpflichen Exergiezustroms der Sonnenenergie nachhaltige Strukturen und Kreisläufe aufgebaut und aufrecht erhalten werden können, und wie sich im Zuge eines jahrmillionenlangen Evolutionsprozesses diese Strukturen und Kreisläufe auch immer weiter ausdifferenzieren und ‚höher entwickeln‘ konnten.

Damit wird die Zielperspektive eines Nachhaltigen Wirtschaftens mit Blick auf den Umgang mit Stoffen und Energien in der Technosphäre zugegebenermaßen noch einmal ziemlich ‚hoch gehängt‘. Dies muss irritieren, gerade auch angesichts der bescheidenen Fortschritte, die soeben als ‚praktische Erfolge‘ dieses Modellprojekts herausgestellt wurden. Es waren wirklich nur kleine Schritte in Kooperation mit Unternehmen in der Metallwirtschaft der Region Hamburg möglich. Und es waren meist Schritte, die noch nicht die eigentlich gravierenden, langfristigen, globalen und irreversiblen Nachhaltigkeitsdefizite angehen. Die praktischen Erfolge sind ‚Erfolge‘ wenn man den Fokus vor Ort belässt, wenn man aber den Blick weitet, ist die breit klaffende Lücke zwischen den großen Zielen und den kleinen Schritten kaum noch zu ertragen. Aber es hilft nichts, die Kluft zwischen großem Ziel und real möglichen kleinen Schritten, die Kluft zwischen dem ‚globalen Denken‘ und ‚lokalen Handeln‘ muss ausgehalten werden. Alarm schlagen ist wichtig und gehört angesichts der globalen, schleichenden und langfristig sich aufbauenden Problemdimensionen zur Aufgabe der Wissenschaft. Alarmismus hilft aber nicht weiter. Ob uns wirklich genügend Zeit bleibt für die nötigen Umsteuerungsprozesse, können wir ohnehin nicht wissen.

15 Literatur

- Adriaanse, A.; Bringezu, S.; Hammond, A.; Moriguchi, Y.; Rodenberg, E.; Rogich, D.; Schütz, H.: Resource Flows: the Material Basis of Industrial Economies (World Resources Institute) Washington D. C. 1997
- AGIMUS: Projekt Nachhaltige Produktentwicklung, <http://www.agimus.de/dzplhb.html> (12/2000)
- Alexandros, Nikos (ed.): World Agriculture: Towards 2010 – FAO Study, FAO USA, Chichester, New York et al.: John Wiley & Sons 1995
- Andersson, B. A.: Materials availability for large-scale thin-film photovoltaics, in: Progress in Photovoltaics 8, S. 61-76
- ARGE-Altauto (Hrsg.): Monitoringbericht, Frankfurt, 2000
- Ayres, R. U. u. Simonis, U. E. (Hrsg.): Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development, UN-University Press Tokyo, New York 1994
- Ayres, R. U., Ayres, L.W.; Rade, I.: The Life Cycle of Copper, its Co-Products and Byproducts, (first draft) INSEAD, Fontainebleau 2002
- Ayres, R.; Ayres, L. W.; Masini, A.: An Application of exergy accounting to five basic metal industries, in: Gleich, A. von, Ayres, R.; Gößling-Reisemann, S. (eds.): Sustainable Metals Management, Kluwer Dordrecht 2004
- Baccini, P.; Baader, H.P.: Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung, Spektrum, Heidelberg 1996
- Baccini, P.; Brunner, P.H.: Metabolism of the Anthroposphere, (Springer) Heidelberg, New York 1991
- Baehr, H.D.: Thermodynamik, Springer Verlag, Berlin, 1996
- Barin, I.: Thermochemical data of pure substances, Weinheim, VCH, 1989
- Bartholomé, E.; Ullmann, F.: Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, Verlag Chemie, Weinheim, 1985
- Baumgardt, K.: The Ok Tedi Pages - Ecological and Social Impacts of Large Mining Projects to a Developing Country, , in: Gleich, A. von, Ayres, R.; Gößling-Reisemann, S. (eds.): Sustainable Metals Management, Kluwer Dordrecht 2004
- Baumgärtner, S.: Ambivalent Joint Production and the Natural Environment. An Economic and Thermodynamic Analysis. Physica-Verlag, Heidelberg, New York 2000.
- Bäune, R.; Martin, H.; Schulze, L.: Handbuch der innerbetrieblichen Logistik, Band 2: Auswahl von Flurförderzeugen, 2. überarbeitete Auflage, Jungheinrich Aktiengesellschaft, Hamburg, 1998
- Becker, E.; Jahn, T. (eds.): Sustainability and the Social Sciences. Zed Books, Lindon, New York 2002
- Behrendt, S.; Erdmann, L.; Handke, V.: Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen. Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente zur Schließung von Kreislaufücken für Kupfer und Blei unter Einbeziehung ökonomischer, rechtlicher und ökologischer Aspekte, Folien der Ergebnispräsentation am IZT vom 12. 2. 2002
- Bertram, M; Graedel, T.E.; Rechberger, H.; Spatari, S.: The Contemporary European Copper Cycle: Waste Management Subsystem , in: Ecological Economics 42 (1-2) 2002
- Bierter, W.; Stahel, W. R.; Schmidt-Bleek, F.: Ökointelligente Produkte, Dienstleistungen und Arbeit. Wuppertal Spezial 2. Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie.

Wuppertal 1996.

- Birat, J.P.; Baillet, G.: Converting Iron Units into quality steel; Ironmaking & Steelmaking, vol.26, Jan.-Feb., pp 33-44, 1999
- Birat, J.P.L.: Residuals and tramp elements in scrap and steel; in: 15th PTD Conference Proceedings, 1995, S.: 53-65
- Biswas, A.K.; Davenport, W.G.: Extractive metallurgy of copper, Pergamon, Oxford, 1994
- Bleischwitz, R.: Ressourcenproduktivität – Innovationen für Umwelt und Beschäftigung (Springer) Berlin, Heidelberg, New York 1998
- Bossel, H.: Ökosystemar basierte Leitbilder für eine Nachhaltige Entwicklung, in: Handbuch der Umweltwissenschaften – 5. Erg. Lfg. 11/99
- Brahmer-Lohss, M.; von Gleich, A.; Gottschick, M.; Horn, H.; Jepsen, D.; Kracht, S.; Reihlen, A.; Rolf, A.; Sander, K.: Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg – Grundlagen und Vorgehensweisen, Universität Hamburg Fachbereich Informatik Hrsg., Mitteilung 296, Hamburg 2000 (Zwischenbericht herunterladbar unter www.nachhaltige-metallwirtschaft.de)
- Brahmer-Lohss, M.; Dräger, H.-J., von Gleich, A.; Gottschick, M.; Horn, H.; Jepsen, D.; Kracht, S.; Lohse, J.; Lorenzen, S.; Sander, K.: Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg – Zwischenergebnisse und Perspektiven. Universität Hamburg Fachbereich Informatik Hrsg., Mitteilung 305, Hamburg 2001 (Zwischenbericht herunterladbar unter www.nachhaltige-metallwirtschaft.de)
- Braungart, M.; McDonough, W.: Einfach intelligent produzieren. Cradle to cradle: Die Natur zeigt wie wir Dinge besser machen können, Berliner Taschenbuchverlag, Berlin 2003
- Bringezu, S.: Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen: Stoffflussanalyse für eine nachhaltige Raumentwicklung, Springer, Berlin 2000
- Bukold, S.; Thinnies, P.: Maschinenbau in der Region Hamburg, Regionale Verflechtung und das Süd-Nord-Gefälle, in Bukold, S.; Thinnies, P.(Hrsg.): Boomtown oder Gloomtown Strukturwandel einer deutschen Metropole: Hamburg Berlin: Rainer Bohn Verlag, 1991.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Mineralische Rohstoffe – Bausteine für die Wirtschaft, Hannover 1995
- Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen – Zusammenfassung 1999
- Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V: Recycling, Fachbuch Stahlrecycling München: Reed Elsevier Deutschland GmbH, 1998.
- Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V (BDSV): B.-. Recycling - Sortenlisten, Handelsbedingungen, Stoffzuordnungssysteme für das Stahlrecycling Düsseldorf: Verlag Reed Elsevier Deutschland, 1999.
- Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V (BDSV): Statistische Daten für die Stahlrecycling-Wirtschaft, www.bdsv.de/download/pdf/statistik_02.pdf
- Chemical Rubber Company (CRC), D.R. Lide (ed.-in-chief) : CRC handbook of chemistry and physics : a ready-reference book of chemical and physical data, Boca Raton, CRC Press, 1996
- Christensen, J.: Die industrielle Symbiose in Kalundborg. Ein frühes Beispiel eines Recycling-Netzwerks. In: Strebel/Schwarz (Hrsg.): Kreislauforientierte Unternehmenskooperationen – Innovative Verwertungsnetze. Reihe: Lehr- u.

- Handbücher zur Ökologischen Unternehmensführung und Umweltökonomie, München 1998
- Clark, John G. The Political Economy of World Energy – A Twentieth Century Perspective. Chapel Hill & London: University of Carolina Press 1990,
- Claus, F.; de Man, R.; Völkle, E.; Wiedemann, P.E.: Die Organisation des ökologischen Stoffstrommanagements; in: *Umweltverträgliches Stoffstrommanagement: Konzepte, Instrumente, Bewertung*. Studien im Auftrag der Enquetekommission "Schutz des Menschen und der Umwelt", Bd. 4, Bonn, 1994
- Clausen, J.; Stahlmann, V.: Umweltleistung von Unternehmen. Von der Ökoeffizienz zur Ökoeffektivität, Gabler Verlag, Wiesbaden 2000
- Cleveland, C.; Ruth, M.: Indicators of dematerialization and the material intensity of use, in: *Journal of Industrial Ecology*, 2 1999, S. 15-50
- Corradini, R.; Hutter, C.; Köhler, D.: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen Teil 1, Allgemeiner Teil, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 1999
- Craig, J. R. et al: Resources of the Earth – Origin, Use and Environmental Impact, New Jersey 1996
- Craig, J. R., Vaughan, D. J., and Skinner, B. J.: Resources of the Earth: Origin, Use, and Environmental Impact (3rd edn): Prentice Hall, New Jersey 2001
- CSD United Nations Commission on Sustainable Development: Indicators of Sustainable Development. Framework and Methodologies New York: 1996.
- da Costa Ribeiro, P. J.: Spanende Bearbeitung nichtrostender Stähle mittels Minimalmengenkühlschmierung, Diplomarbeit am FB Maschinenbau und Produktion Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg 2002
- Daily, G.C.; Ehrlich, P. R.: Population, sustainability, and Earth's carrying capacity: a framework for estimating population sizes and lifestyles that could be sustained without undermining future generations, in: *BioScience* 42: 761-71 1992
- Daly, H.: Towards some operational principles of sustainable development, in: *Ecological Economics*, Vol. 2 pp 1-6, 1990
- Daly, H.: *Steady-state Economics* (2nd ed.) Island Press Washington D. C. 1991
- Davenport, W.G.; Partelpoeg, E.H.: *Flash Smelting : Analysis, Control and Optimization*, Pergamon Press, New York, 1987
- Dicke, W.; Schneider, H.: *Alles über Gabelstapler, Gestaltung, Einsatz, Literatur, Rechtsgrundlagen*, 3. erweiterte und aktualisierte Auflage, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1994
- Dierkes, M; Hoffmann, u.; Marz, L.: *Leitbild und Technik – Zur Entstehung und Steuerung technischer Innovationen*, Berlin (edition sigma) 1992
- Dieter, Hermann, H.: *Verkommt die Ökosphäre zum ökotoxikologischen Großlabor?* Institut für interdisziplinäre Forschung und Ökologie, Düsseldorf 1984
- Dreher, C.; Schirrmeister, E., 2000: *Der lange Weg zur Kreislaufwirtschaft. Umweltschutz in der Investitionsgüterindustrie zielt bisher vorrangig auf die Verringerung produktionsbedingter Emissionen*. Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung Nr. 18, Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Enquête-Kommission ‚Schutz des Menschen und der Umwelt‘ des 13. Deutschen Bundestages: *Konzept Nachhaltigkeit - Vom Leitbild zur Umsetzung*, Bonn 1998
- Enquête-Kommission 'Schutz des Menschen und der Umwelt': *Die Industriegesellschaft gestalten - Perspektiven für einen nachhaltigen Umgang mit Stoff- und*

Materialströmen, Bonn 1994

- Ericsson, Anna / Erixon, Gunnar: Controlling Design Variants – Modular Product Platforms, Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers 1999.
- Erdmann, L.: Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen – Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente zur Schließung von Kreislauflücken für Kupfer und Blei unter Einbeziehung ökonomischer, rechtlicher und ökologischer Aspekte (Projekt gefördert von der Volkswagenstiftung) IZT Berlin 2002
- European Confederation of Iron and Steel Industries (EUROFER) – Environmental Committee – Task Group Electric Arc Furnace Steelmaking: Document on ‘Electric Arc Furnace Steelmaking’ Brussels 1997
- Evans, A. M.: An Introduction to Economic Geology and its Environmental Impact, Oxford 1997
- Eyerer, P.: Ganzheitliche Bilanzierung – Werkzeug zum Planen und Wirtschaften in Kreisläufen, Springer 1996
- Eyerer, P.: Minimalschmiersysteme für die Zerspantechnik – Anwendung, technische Optimierung und wirtschaftlich-umweltliche Bewertung, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Mai 1997
- FAO (ed.): FAO Production Yearbook, Vol. 23-50, FAO 1969-1996
- Fels, T.: Regionales Stoffstrommanagement als Beitrag einer nachhaltigen Raumentwicklung – Der Klärschlammhaushalt Schleswig-Holsteins, Dissertation Universität Kiel, Kiel 2002
- Fishbein, Bette K.; McGarry, Lorraine S.; Dillon, Patricia S.: Leasing: A Step Toward Producer Responsibility, INFORM, New York, 2000
- Flatz, A.: Organisationsansätze zu einem nachhaltigen Stoffstrommanagement am Beispiel elektronischer Produkte, St. Gallen 1995.
- Fleig, J.; Böhler A.: Nutzungsintensivierung und Lebensdauererlängerung als Gegenstand der Forschung. In: Fleig, J. (Hrsg.): Zukunftsfähige Kreislaufwirtschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag 2000
- Fleischer, G., Schmidt, W.-P.: Iterative Screening LCA in an Eco-Design Tool, Int. J. LCA 2 (1), S. 20-24, 1997
- Forest Products Society (ed.): The Globalization of Wood: Supply, Processes, Products, and Markets, Proceedings No. 7319, Publication of Conference Papers, Portland/Oregon 1994
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft (ffe), München, Internetseiten zur Ganzheitlichen Bilanzierung von Materialien: www.ffe.de/strom, Zugriff in 9/01; www.ffe.de/ganzh, Zugriff in 9/01; www.ffe.de/details/gabie/metall.htm, Zugriff in 6/01; www.ffe.de/details/gabie/kunst.htm, Zugriff in 6/01
- Frank, M; Fichtner, W.; Rentz, O.: Chancen und Hemmnisse von regionalen Unternehmenskooperationen zur Energieversorgung. In: Thomas Kluge, Engelbert Schramm (Hrsg.): Aktivierung durch Nähe - Regionalisierung nachhaltigen Wirtschaftens. ökom Verlag, München
- Friege, H.; Engelhardt, C.; Henseling, K.O. (Hrsg.): Das Management von Stoffströmen. Geteilte Verantwortung – Nutzen für alle, Springer, Berlin 1998
- Funtowicz, S.: Post-Normal Science. Science and Governance under Conditions of Complexity, in: Politeia XVII: 62, 77-85 2001
- Glatzel, W.-D., Kaschenz, H.: Der Kumulierte Energieaufwand als Kennwert in Ökobilanzen - Bedeutung und Grenzen, in: VDI-Berichte 1218, Kumulierter Energieaufwand,

- VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
- Gleich, A. von: Bionik - Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur? (B.G. Teubner) Stuttgart 1998
- Gleich, A. von (Hrsg.): Bionik - Ökologische Technik nach dem Vorbild der Natur? (B.G. Teubner 2. überarb. Auflage) Stuttgart 2001
- Gleich, A. von: Ökologische Kriterien der Technik- und Stoffbewertung: Integration des Vorsorgeprinzips, Teile I-III in: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Jg. 10, Nr. 6 1998, Jg.11 Nr.1 und 2 1999
- Gleich, A. von; Gottschick, M.; Jepsen, D.: Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg - Räumliche Nähe als Erfolgsfaktor für nachhaltigkeitsorientierte Modernisierung in einer Metropolen-Region. In: Thomas Kluge, Engelbert Schramm (Hrsg.): Aktivierung durch Nähe - Regionalisierung nachhaltigen Wirtschaftens. ökom Verlag, München 2003
- Gleich, A. von; Ayres, R.; Gößling-Reisemann, S. (eds.): Sustainable Metals Management, Kluwer Dordrecht 2004
- Glenz, W.: Die Kunststoffindustrie der Welt, in: Kunststoffe, Jg. 79, Heft 11, Nov. 1989, S. 1238-1266.
- Göpfert, J.: Modulare Produktentwicklung. Dissertation Ludwig-Maximilians-Universität München: 1998
- Gößling, S.: Entropy production as a measure for resource use, Dissertation, Universität Hamburg (<http://www.sub.uni-hamburg.de/opus/volltexte/2004/1182/>), 2001
- Gößling-Reisemann, S: Entropy balance of industrial copper production: a measure for resource use. First results for flash smelting, converting and refining, <http://www.tecdesign.uni-bremen.de/sgr/beschreibung.html> (2004)
- Goto, S.: The Application of Thermodynamic Calculations to Converter Practice, in : R.E. Johnson (Hrsg.) : Copper and Nickel Convertes, Proceedings, 33-55, The Metallurgical Society of AIME, 1979
- Gottschick, M.: How to Guide Inter-Company Cooperation towards Life Cycle Management. A Method for Stepwise Modeling, SETAC Europe: 10th LCA Case Studies Symposium 2.-4. 12. 2002 Barcelona SP
- Gottschick, M.: Implementing Life Cycle Management for Production Chains using Life-Cycle-Images: A Method for Stepwise Modeling. International Society for Industrial Ecology: Industrial Ecology for a Sustainable Future 29. 6.-2. 7. 2003 Ann Arbor Michigan
- Gottschick, M.: Partizipative Stoffstromanalyse für Unternehmenskooperationen – Am Beispiel der Altauverwertung, Dissertation eingereicht TU Clausthal 2004
- Gottschick, M.; Jepsen, D.: Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg – Projektbeschreibung, Ansätze, Zugänge und praktische Erfahrungen beim Aufbau von zwischenbetrieblicher Kooperation. In: Liesegang et. al (Hrsg.): Aufbau und Gestaltung regionaler Stoffstrommanagementnetzwerke. Betriebswirtschaftlich-ökologische Arbeiten, Band 4, S. 125..139, Heidelberg 2000
- Gottschick, M.; Gleich, A. von; Sander, K.: Life-Cycle Management of Steel: Copper as a Tramp Element. SETAC Europe: Annual Meeting in Hamburg Germany, 27.4. – 1. 5. 2003
- Gottschick, M.; Hafkesbrink, J.; Sterr, T.; Biesecker, A.: Nachhaltigkeitsorientierte Stoffstrommanagementnetzwerke und –kooperationen für das produzierende Gewerbe, eingereicht bei GAIA 2004

- Graedel, T. E.: Material substitution: a resource supply perspective, in: Resources, Conservation and Recycling 34 (2) 2002a p.107-115
- Graedel, T., E.: Industrial Ecology: Definition and Implementation. In R. Solocow et al (eds.): Industrial Ecology and Global Change, Cambridge University Press 1994
- Graedel, T.E.; Bertram, M.; Fuse, K.; Gordon, R.B.; Lifset, R.; Rechberger, H.; Spatari, S.: The Characterization of Technological Copper Cycles, in: Ecological Economics 42 (1-2) 2002b
- Greiner, S.; Großmann, H.; Koopmann, G.; Matthies, K.; Michaelowa, A.; Steger, S.: Wechselwirkungen der Energie- und Klimapolitik mit WTO-/GATT-Regeln, unveröffentlichter Bericht des HWWA an die Enquete-Kommission, 2001
- Großmann, D. et al: Analyse und Steuerung regionaler Stoff- und Energieflüsse. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Natur und Forsten des Landes Schleswig-Holstein, Kiel/Hamburg 1999
- Großmann, D. et. al: Analyse und Steuerung regionaler Stoff- und Energieflüsse am Beispiel des Gewerbegebietes Henstedt-Ulzburg/Kaltenkirchen, Hauptstudie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Natur und Forsten des Landes Schleswig-Holstein, Hamburg 2002
- Großmann, D.; Sander, K.; Dittmann, W.; Sturm, K-D.; Westphal, K.: Analyse und Steuerung regionaler Stoff- und Energieflüsse Das Gewerbegebiet Henstedt-Ulzburg/Kaltenkirchen strebt durch überbetriebliche Stoffstrom- und Energievernetzung eine Entwicklung zur ökologischen Modellregion an. <http://www.oekopol.de/de/Archiv/Stoffstrom/GewArt.html>
- Guinée, J.B.; van den Bergh, J.C.J.M.; Boelens, J.; Fraanje, P.J.; Huppes, G.; Kandelaars, P.P.A.A.H.; Lexmond, Th.M.; Moolenaar, S.W.; Olsthoorn, A.A.; Udo de Haes, H.A.; Verkuijden, E.; van der Voet, E.: Evaluation of risks of metal flows and accumulation in economy and environment, Ecol. Econ. 30, 1999 47-65
- Hafkesbrink, J.: Kleiner Almanach der Mobilisierung von regionalen umweltorientierten Akteurs-Netzwerken. In: Thomas Kluge, Engelbert Schramm (Hrsg.): Aktivierung durch Nähe - Regionalisierung nachhaltigen Wirtschaftens. ökom Verlag, München 2003
- Handelskammer Hamburg (Hrsg.): „Metropolregionen im Wettbewerb“, Hamburg 2000
- Handke, V.: Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen – Handlungsoptionen und Steuerungsinstrumente zur Schließung von Kreislaufücken für Kupfer und Blei unter Einbeziehung ökonomischer, rechtlicher und ökologischer Aspekte (Projekt gefördert von der Volkswagenstiftung) IZT Berlin Ergebnispräsentation vom 12. 2. 2002
- Hartmann, D. R.: Simulation des kumulierten Energieverbrauches industrieller Produkte, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik der TU München, München, 1986
- Heiskanen E.; Halme, M.; Jalas, M.; Kärnä, A.; Lovio, R.: Dematerialisation: The Potential of ICT and Services. Ministry of the Environment, Helsinki, 2001
- Heiskanen E.; Jalas, M.: [Dematerialization Through Services - A Review and Evaluation of the Debate](#). Helsinki: Ministry of the Environment 2000
- Hess, R.: RESALE 2001 - 7. Internationale Messe für gebrauchte Maschinen und Anlagen, Nürnberg, 30. April bis 2. Mai 2001, Pressedownload auf www.resale2001.de, Zugriff in 3/2001
- Hinterberger, Friedrich: Leitplanken, Präferenzen und Wettbewerb - Grundlagen einer ökonomischen Theorie ökologischer Politik, in: A. Renner/F. Hinterberger (Hg.), Zukunftsfähigkeit und Neoliberalismus. Baden-Baden: Nomos Verlag 1998, 73-

- Hirschl, B.; Konrad, W.; Scholl, G.: Neue Nutzungskonzepte für Produkte: ökologische Entlastungspotenziale, Umsetzungsprobleme und Entwicklungsperspektiven von Strategien zur Nutzungsdauerverlängerung und Nutzungsintensivierung, IÖW, Regionalbüro Baden-Württemberg, 2000a
- Hirschl, Bernd; Konrad, Wilfried; Scholl, Gerd: Nutzungsregime im Wandel – Ökoeffiziente Dienstleistungen für einen nachhaltigen Konsum, in: Ökologisches Wirtschaften, 5/2000b
- Hirschl, Bernd; Konrad, Wilfried; Scholl, Gerd U.; Zundel, Stefan: Nachhaltige Produktnutzung. Sozial-ökonomische Bedingungen und ökologische Vorteile alternativer Konsumformen, Edition Sigma, Berlin 2001
- Hoffmann, M.: Die Rückgewinnung von Zink und Blei aus Stäuben der Elektrostahlerzeugung, Manuskript B.U.S. Bercelius Umwelt Service AG Duisburg 1997
- Hoffmann, C.: Kumulierter Energieaufwand und optimierte Nutzungsdauer von Personenkraftwagen, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik der TU München, München, 1996
- Hofmeister, S. : Von der Abfallwirtschaft zur ökologischen Stoffwirtschaft – Wege zu einer Ökonomie der Reproduktion, Opladen 1998
- Holling, C. S.: Resilience and stability of ecological systems, in: Annual Review of Ecology and Systematics 4 pp 1-23, 1973
- Holling, C. S.: The Resilience of Terrestrial Ecosystems: Local Surprise and Global Change, in: Clark, W.; Munn, R. (eds.): Sustainable Development of the Biosphere, Cambridge University Press 1986
- Huber, J. : Industrielle Ökologie. Konsistenz, Effizienz und Suffizienz in zyklusanalytischer Betrachtung, in: Simonis, E. U. (Hrsg.): Global Change, (Nomos) Baden-Baden 2000
- Huber, J. Nachhaltige Entwicklung, Sigma Berlin 1995
- Huber, J.: Ökologische Konsistenz. Zur Erläuterung und kommunikativen Verbreitung eines umweltinnovativen Ansatzes, in: Umweltbundesamt (Hrsg.): Perspektiven für die Verankerung des Nachhaltigkeitsleitbildes in der Umweltkommunikation, UBA-Berichte 4/01, Erich Schmidt Verlag Berlin 2001
- Hübner, K.: Theorie der Regulation. Eine kritische Rekonstruktion eines neuen Ansatzes der Politischen Ökonomie. 2. durchges. und erw. Aufl. Berlin: Edition Sigma Bohn 1990.
- Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Best Available Techniques Reference Document on the Production of Iron and Steel, European Commission, Brussels 2001
- International Institute for Sustainable Development (IISD): Compendium of Sustainable Development Indicator Initiatives and Publications, (2004)
<http://www.iisd.org/measure/compendium/>
- International Iron and Steel Institute (IISI) (ed): EAF Technology - State of the Art & Future Trends, Brussels, 2000
- Institute of Materials, Minerals and Mining: IMM Definitions of reserves and resources and guidelines and criteria (approved 1991) <http://www.imm.org.uk/immres.htm> (2004)
- Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference Document on Best Available

- Techniques in the Non Ferrous Metal Industries, IPPC, Sevilla, 2000
- Jackson, T. (ed.), Clean production strategies, Lewis Publishers Boc Raton 1993
- Jänicke, M.; Mönch, H.; Binder, M.: Umweltentlastung durch industriellen Strukturwandel. Berlin: Ed. Sigma 1992
- Jänicke 1996
- Janke, D.; Savov, L.; Vogel, M.E.: Secondary materials in steel production and recycling, in: Gleich, A. von; Ayres, R.; Gößling-Reisemann, S. (eds.): Sustainable Metals Management, Kluwer Dordrecht 2004
- Jepsen, D.; Sander, K.: Verwertungsoptionen für Schleifschlämme, Einsatz im Kupolofen
- Karlsson, S.: Dematerialization of the metals turnover – some reasons and prospects, in: Gleich, A. von; Ayres, R.; Gößling-Reisemann, S. (eds.): Sustainable Metals Management, Kluwer Dordrecht 2004
- Kemp, R.: An Economic Analysis of Cleaner Technology: Theory and Evidence, in: Fischer, K.; Schot, J. (eds.): Environmental Strategies for Industry. International Perspectives, Washington/Covelo, Island Press 1993
- Kemp, R.; Soete, L.: The Greening of Technological Progress, in: futures, June 1992
- Kilper, H.; Latniak, E.: Einflussfaktoren betrieblicher Innovationsprozesse – zur Rolle des regionalen Umfeldes“, in Brödner, P.; Pekruhl, U.; Rehfeld, D. (Hrsg.): „Arbeitsstellung ohne Ende? Von den Schwierigkeiten inner- und überbetrieblicher Zusammenarbeit“, München 1996
- Kippenberger, C.; Krauß, U.; Wagner, H.; Mori, G.: Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe, Teil Kupfer, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover, Hannover, 1998
- Klemmer, P., Becker-Soest, D., Wink, R.: Leitstrahlen, Leitbilder und Leitplanken - die drei großen "L" der Nachhaltigkeitspolitik. In: Renner, A.; Hinterberger, F. (Hrsg.): Zukunftsfähigkeit und Neoliberalismus. (Nomos) Baden-Baden 1998
- Kluge, T.; Schramm, E. (Hrsg.): Aktivierung durch Nähe – Regionalisierung nachhaltigen Wirtschaftens, ökom verlag München 2003
- Kopke, M.: Norddeutsche Affinerie, mündliche Mitteilung, 2000
- Kreibich, R.; Rogall, H.; Boes, H. (Hrsg.): Ökologisch produzieren, Weinheim Beltz 1991
- Krüger, J. et al : Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung und -verarbeitung (Teil 1-3), in: Metall 49, 252-257, 318-324, 434-440, Hüthig, 1995
- Krüger, J. ;Rombach, G. : Sachbilanz zur Kupfererzeugung unter Berücksichtigung der Endenergien, in: Metall 52, 636-642, Hüthig, 1998
- Krüger, J: Opportunities for Optimisation in Copper Production, in : A. v. Gleich, R. U. Ayres, S. Gößling-Reisemann (Hrsg.): Sustainable Metals Management, Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 2004
- Kuckshinrichs, W.; Hüttner, K.-L. (Hrsg.): Nachhaltiges Management metallischer Stoffströme – Indikatoren und deren Anwendung, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Bd. 31, Jülich 2001
- Kühr, R.: Das Zero-Emissions-Konzept: Zum Stand der Dinge, in: in: Altner, Günter et al. (Hrsg.): Jahrbuch Ökologie 2001, München 2000, S. 119-128
- Kulick, B.: Kostenreduzierung beim Einsatz von Flurförderzeugen, in: VDI Berichte Nr. 1468, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Umweltmanagement in der metallverarbeitenden Industrie, Karlsruhe 1994

- Landner, L.; Lindeström, L.: Copper in society and in the environment, 2nd. rev. ed. Swedish Environmental Research Group, Vaesteras, Sweden 1999
- Läpple, D.; Bukhold, S.; Endres, E.: „Maschinenbau in der Region Hamburg“, TU Hamburg-Harburg, AB Stadtökonomie, Hamburg 1993
- Liedtke, C., Merten, T., Kuhndt, M. und Baku, B.: Materialintensitätsanalysen von Grund-, Werk- und Baustoffen (3) Die Stahlveredler (Ferro)-Chrom und (Ferro)-Nickel Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 1995.
- Liesegang, D.; Sterr, T.; Ott, T. (Hrsg.): Aufbau und Gestaltung regionaler Stoffstrommanagementnetzwerke. Betriebswirtschaftlich-ökologische Arbeiten, Band 4, S. 125..139, Heidelberg 2000
- Linstrom, P.J.; Mallard, W.G. (Eds.): NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, July 2001, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899 (<http://webbook.nist.gov>), 2001.
- Lorenzen, S.: Nutzung von Ökobilanzen im Konstruktionsprozess von komplexen technischen Produkten - Versuch der anwendungsorientierten Erstellung einer Ökobilanz für wiederkehrende Baugruppen von Röntgengeräten, Diplomarbeit an der FH Wedel, 1998, unveröffentlicht
- MacCain, J.D.; Floyd, J.M.: Converting, Fire Refining and Casting, Proceedings, The Minerals, Metals & Materials Society, 1994
- Man, R. d.: Erfassung von Stoffströmen aus naturwissenschaftlicher und wirtschaftswissenschaftlicher Sicht. Akteure, Entscheidungen und Informationen im Stoffstrommanagement, in: Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt" des Deutschen Bundestages (Hrsg.): Studienprogramm Umweltverträgliches Stoffstrommanagement, Bonn: 1995.
- Man, R. d.; Claus, F.; Völkele, E.; Ankele, K.; Fichter, K.: Aufgaben des betrieblichen und betriebsübergreifenden Stoffstrommanagements Berlin: Umweltbundesamt, 1997.
- Marique, C. (ed.): Recycling of Scrap for High Quality Products, 1996 Report of the ECSC Research Project 7210-CB, Brussels, 1997
- Matthews, E. et al: The Weight of Nations: Material Outflows from Industrial Economies (World Resources Institute) Washington D. C. 2000
- McLennan, S. M. and Taylor, S. R.: Heat flow and the chemical composition of continental crust. J. Geol., 104, 1996 p 369-377
- Meadows, D.; Zahn, E.; Milling, P.: Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit, Reinbek 1973
- Mehldorn, J.: Verlagerung von Wartung und Reparatur zu Spezialisten. Fallbeispiel aus der chemischen Industrie, in: VDI-Berichte 231, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- Merian, E.: Metalle in der Umwelt, Weinheim 1984
- Messner, F.: Towards a sustainable copper industry? Trends in resource use, environmental impacts and substitution in the global copper industry in: Gleich, A. von; Ayres, R.; Gößling-Reisemann, S. (eds.): Sustainable Metals Management, Kluwer Dordrecht 2004
- Metallgesellschaft AG; World Bureau of Metal Statistics (Hg.): Metallstatistik / Metal Statistics 1985-1995, 83. Jg., Frankfurt am Main 1996: Metallgesellschaft AG und Ware/GB: World Bureau of Metal Statistics.
- Mol, A. P. J. : The Refinement of Production. Ecological Modernization Theory and the Chemical Industry, Utrecht (van Arkel) 1995
- Möller, A.: Grundlagen stoffstrombasierter Betrieblicher Umweltinformationssysteme

- Hamburg: Universität Hamburg, 1999.
- Möller, A.; Rolf, A.: Methodische Ansätze zur Erstellung von Stoffstromanalysen, in M. Schmidt; A. Schorb: 1995.
- Müller-Fürstenberger, G.: Kuppelproduktion. Eine theoretische und empirische Analyse am Beispiel der chemischen Industrie, Heidelberg. 1995
- Müller-Plantenberg, C.: Social and Ecological Effects of the Bauxite-Energy-Aluminium Product Chain - Steps Towards a Sustainable Metals Management in: Gleich, A. von; Ayres, R.; Gößling-Reisemann, S. (eds.): Sustainable Metals Management, Kluwer Dordrecht 2004
- Müller-Reißmann, K.F.; Bossel, H.: Kriterien für Energieversorgungssysteme, Hannover 1979
- Müller-Reißmann, K.F.; Bossel, H.: Kriteriensystem zur Bewertung von neuen Informations- und Kommunikationstechniken und ihrer Alternativen, Hannover 1987
- Niethammer, R.: Modulare Werkzeugmaschinengliederung unter dem Gesichtspunkt wirtschaftlicher und ökologischer Gestaltung zum Produktrecycling. Dissertation TU Freiberg: 1997
- Niewöhner, D.; Renz, R. : Blickregistrierung zur Quantifizierung der Demontagezeiten von Elektro(nik)-Altgeräten, in: Recyclingorientierte Entwicklung technischer Produkte 2000: Management komplexer Zielkonflikte, VDI-Tagung Düsseldorf 2000
- Nilarp, F.: The flow of copper in the Swedish society in a sustainability perspective, thesis work, Institute of Physical Resource Theory, Chalmers University of Technology and Göteborg University, Göteborg 1994 (in Swedish)
- Norddeutsche Affinerie: Produktionswege der NA, Hamburg, o.J.
- Noro, Katsuhiko; Takeuchi; Mitsugu; Mizukami, Yoshimasa: Necessity of Scrap Reclamation Technologies and Present Conditions of Technical Development, in: ISIJ International., Vol. 37 (1997) No. 3, pp. 198-206,
- Nowotny, H.; Scott, P.; Gibbons, M.: Re-Thinking Science. Knowledge and the Public in an Age of Uncertainty. Cambridge: Polity Press, 2001.
- Odum, E.P.: Grundlagen der Ökologie (Georg Thieme Verlag) Stuttgart New York 1983
- OECD: Frameworks to Measure Sustainable Development – An OECD Expert Workshop, Paris 1999
- Pahl, G.; Beitz W.: Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag, 4. Auflage 1997
- Paton, B.: Design for Environment. A Management Perspective, in: Socolow, R.; Andrews, C.; Berkout, F.; Thomas, V. (eds): Industrial Ecology and Global Change, Cambridge University Press 1994
- Patyk, A.; Reinhardt, G.A.: Life Cycle Comparison of the Environmental Impacts of Conventional and Electric Vehicles under European Conditions, IFEU - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Copyright: Society of Automotive Engineers, Inc., 1998
- Petrascheck, W. E.; Petrascheck, W.: Lagerstättenlehre – Eine Einführung in die Wissenschaft von den mineralischen Bodenschätzen (4. Aufl. überarbeitet von Walter Pohl), E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1992
- Philipp J.A. et al. (1994): Oekobilanzen für Stahlprodukte - Sachstand und Perspektiven. Stahl und Eisen 114 (1994), Nr.11, S. 71-78
- Philipp, J. A., Theobald, W.; Volkhausen, W.: et. al.: Fortschreibung der Ökobilanz für

- Stahlprodukte, in: Stahl und Eisen, 116, (1996) Nr. 11, S. 99-104
- Philipp, J. A.; Johann, H.P., Seeger, M., Brodersen, H.A., Theobald, W.: Recycling in der Stahlindustrie. In: Stahl und Eisen, 112, (1992) S. 75ff.
- Porter, Michael E.: Nationale Wettbewerbsvorteile, München 1991
- Proceedings of the Copper 91 - Cobre 91 International Symposium : August 18-21, 1991, Ottawa, Canada; Pergamon Press, New York, 1991
- Quinkertz, R.; Rombach, G.: Primärenergieaufwand und kumulierte Emissionen verschiedener Elektrolysesysteme zur Aluminiumherstellung, in: Erzmetall, 52, 1999 S.: 393-402
- Rechberger, H.; Brunner, H. P.: A new, entropy based method to support waste and resource management decisions, in: Environmental Science and Technology, 2002, vol 34, No. 4 p. 806-816
- Rechberger, H.; Graedel, T. E.: The contemporary European copper cycle: Statistical entropy analysis in: Ecological Economics 42 (1-2) 2002
- Rechenberg, I. Evolutionsstrategie. Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution, Stuttgart Frommann 1973
- Rees, W.; Wackernagel, M.: Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth, Gabriola, BC and Philadelphia, PA: New Society Publishers 1995
- Renn, O.; Leon, C. D.; Clar, D.: Nachhaltige Entwicklung in Baden-Württemberg – Statusbericht 2000, Arbeitsbericht der Akademie für Technikfolgenabschätzung 173, Stuttgart 2000
- Rentz, O.; Püchert, H.; Penkuhn, T.; Spengler, T.: Stoffstrommanagement in der Eisen- und Stahlindustrie - Konkretisierung des § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG, Abschlußbericht zum gleichnamigen Projekt im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), Forschungsbericht 95-104 06 001, Karlsruhe 1995
- Rip, A.; Misa, T.; Schot, J. (eds.): Managing Technology in Society. The Approach of Constructive Technology Assessment, London/New York Pinter 1995
- Rödig, W.; Scherr, P.: Dr. Rödigs Enzyklopädie der Flurförderzeuge, 5. überarbeitete und erweiterte Ausgabe, AGT Verlag Thum GmbH, Ludwigsburg, 1997
- Rogich, D. G.: Materials Use, Economic Growth and the Environment, Paper presented at the International Recycling Congress and REC'93 Trade Fair, Geneva, Bureau of Mines, Washington D. C. 1993
- Rolf, A.: Stoffstrommanagement und Informatik, Fachbereich Informatik, FBI-HH-B-171/94 Hamburg 1994
- Rombach, G.: Institut für Metallwesen und Elektrometallurgie, RWTH Aachen, mündliche Mitteilung, 2000
- Rombach, G.: Limits of Metal Recycling, in: Gleich, A. von; Ayres, R.; Gößling-Reisemann, S. (eds.): Sustainable Metals Management, Kluwer Dordrecht 2004
- Rubik, F.: Integrierte Produktpolitik, Metropolis Verlag Marburg 2002
- Rubik, F.; Teichert, V.: Ökologische Produktpolitik, Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1997
- Russo, P., Birat, J.P., Aboussouan, L., Geoffroy, X., Quelier, M., Backert, S.: Upgrading scrap quality by improving shredder operation; o.O. 1998
- Samland, M: Die Entstehung der Elemente
<http://www.astro.unibas.ch/publication/uninova/samland/samland.shtml>
- Sander, K., Lohse, J., Wulf-Schnabel, J.: Anforderungen an das Monitoring im Rahmen der Verwertung langlebiger, technisch komplexer Produkte am Beispiel des Altautos, Berlin, Umweltbundesamt, 1999

- Sander, K., Lohse, J.: Stellungnahme zum ersten Monitoringbericht der ARGE Altau, Berlin, Umweltbundesamt, 2000
- Savov, L.; Janke, D.: Recycling of scrap in steelmaking in view of the tramp element problem, in: Metall, Bd. 52 (1998) Nr. 6, S. 374-383
- Scherhorn, Gerhard (2000). Verbraucherpolitik. In: A. Woll (Hrsg.). *Wirtschaftslexikon*, 9.überarb. Aufl., S. 757-760. München/ Wien: Oldenbourg.
- Schneidewind, U.: ‚Symbole und Substanzen‘ – ein alternativer Blick auf das Management von Wertschöpfungsketten und Stoffströmen, in: Schneidewind, U.; Goldbach, M.; Fischer, D.; Seuring, S. (Hrsg.): *Symbole und Substanzen – Perspektiven eines interpretativen Stoffstrommanagements* (Metropolis Verlag), Marburg 2003
- Schmidt, M.; Schorb, A. (Hrsg.): *Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits*, Springer, Berlin 1995
- Schmidt-Bleek, F.: MIPS - A Universal Ecologic Measure? In: Fresenius Envir. Bull. 2, S. 306-311, 1993a,
- Schmidt-Bleek, F.: MIPS Re-visited, in: Fresenius Envir. Bull. 2:407-412, 1993b
- Schmidt-Bleek, F.: *Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS - Das Maß für ökologisches Wirtschaften*, Berlin u. a. 1994
- Schmidt-Bleek, F.: *Das MIPS-Konzept – Faktor 10*, Droemer Knauer Verlag 1998
- Schöne, S. (Bearb.): „Vom Pfeffersack zum Wirtschaftsingenieur“, Handelskammer Hamburg, Hamburg 1989
- Schrader, U.: *Konsumentenakzeptanz eigentumsersetzender Dienstleistungen: Konzeption und empirische Analyse*, Lang, Frankfurt am Main [u.a.], 2001
- Schubert, H.; Ziegahn, K.-F.; Hirth, T.: *Wirtschaften in Kreisläufen - Strategien, Handlungsfelder, Anregungen BMBF-Verbundvorhaben Strategische Aspekte der Kreislaufwirtschaft und Beschreibung spezifischer Handlungsfelder*, 1997.
- Schubert, U.; Büchele, M.; Flatz, A.: *Stoffstrommanagement - Am Beispiel der Elektronikbranche* Wien: Institut für Umwelt und Wirtschaft, 1994.
- Seliger, G.: *Methodik zur Bewertung von Recyclinggerechtigkeit*. In: Sonderforschungsbereich 281: *Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen*. Publikation der TU Berlin 2000
- Skinner, B. J.: *Earth Resources* (3rd edn.), Prentice-Hall 1986
- Socolow, R.; Andrews, C.; Berkhout, F.; Thomas, V. (eds): *Industrial Ecology and Global Change*, Cambridge University Press 1994
- Spaargaren, G.: *The Ecological Modernization of Production and Consumption. Essays in Environmental sociology*, thesis Landbouw Universiteit Wageningen 1997
- Spangenberg, J. H.; Verheyen, R.: *Von der Abfallwirtschaft zum Stoffstrom-Management*, Gutachten im Auftrag der Friedrich-Ebert-Stiftung, hrsgg. von A. Koschützke, Friedrich Ebert Stiftung Bonn 1996
- Spatari, S.; Bertram, M.; Fuse, K.; Graedel, T.E.; Rechberger, H.: *The Contemporary European Copper Cycle: One Year Stocks and Flows*, in: *Ecological Economics* 42 (1-2) 2002
- Stahel, W.: *Langlebigkeit und Materialrecycling*, Essen Vulkan Verlag 1991
- Stahel, Walter R.: *Langlebigkeit und Mehrfachnutzung - Wege zu einer höheren Ressourcen-Effizienz* in: Rubik, Frieder und Hellenbrandt, Simone (Hrsg.), *Produkt und Umwelt - Anforderungen, Instrumente und Ziele einer ökologischen Produktpolitik*, Metropolis-Verlag, Marburg, 1994
- Stahel, W. R.: *Dienstleistungen mit Hilfe langlebiger Produkte*, in: von Weizsäcker, Ernst

- Ulrich; Seiler-Hausmann, Jan-Dirk (Hrsg.): Ökoeffizienz - Management der Zukunft, Berlin; Basel; Boston: Birkhäuser, 1999
- Stahl, A.: Die Ökologie als Fundgrube für Anwendungen des Entropiegesetzes, in: Praxis der Naturwissenschaften: Physik, Aulis Verlag, Januar 1998
- Stahl, A.: Entropiebilanzen und Ressourcenverbrauch in: Naturwissenschaften 83, 459-466, Springer Verlag, 1996
- Statistisches Bundesamt: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen, Fachserie 18, Reihe 2, Input-Output-Rechnung 1995, Metzler Poeschel, Stuttgart, 2000
- Statistisches Bundesamt: Physische Input-Output-Tabellen 1995, Metzler Poeschel, Stuttgart, 2001
- Steinhilper, R.: . In: Brinkmann, T.; Ehrenstein, G. W.; Steinhilper R.: Aufarbeitungsgerechtes Konstruieren. Umwelt- und recyclinggerechte Produktentwicklung. Augsburg: WEKA Fachverlag 1996
- Sterr, T.: Aufbau eines zwischenbetrieblichen Stoffverwertungsnetzwerks im Heidelberger Industriegebiet Pfaffengrund. Betriebswirtschaftlich-ökologische Arbeiten, Band 1, Heidelberg 1998
- Sterr, T.: Öko-Industrielle Symbiosen – Industrielles Stoffstrommanagement in regionalem Kontext, in: Politische Ökologie, Jg. 62, S. 61-62, München 1999
- Sterr, T.: Industrielle Ballungsräume und die regionale Umsetzung nachhaltigkeitsorientierter Handlungsweisen. In: Thomas Kluge, Engelbert Schramm (Hrsg.): Aktivierung durch Nähe - Regionalisierung nachhaltigen Wirtschaftens. ökom Verlag, München 2003
- Strebel, H.: Kreislaforientierte Unternehmenskooperationen: Stoffstrommanagement durch innovative Verwertungsnetze, München 1998.
- Strohmeier, G.: Steelworks Residues and the Waelz Kiln Treatment of Electric Arc Furnace Dust, in: Iron and Steel Engineer No. 4 (1996), p. 87-90
- Taylor, St.R., McLennan, S.M.: The Continental Crust: its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications. Geoscience texts, 1985
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M. The geochemical evolution of the continental crust. Rev. Geophys. , 33, 1995 p 241-265
- Tippee, Bob (ed.): International Petroleum Encyclopedia, Tulsa: Penn Well Publishing Co 1997,
- Toussaint, D.; Michler, T.: Ökologische und ökonomische Aspekte der Trockenbearbeitung – Fallstudie- in Praxis der Trockenbearbeitung – Tagung Karlsruhe 8.und 9.März 1999 VDI-Berichte 1458, Düsseldorf 1999
- Umweltbehörde Hamburg (Hrsg.): Kursbuch Zukunftsfähiges Hamburg, Hamburg Oktober 1999
- Umweltbundesamt (Hrsg.): Aufgaben des betrieblichen und betriebsübergreifenden Stoffstrommanagements, Bearbeitung: Ankele, K.; Fichter, K.; de Man, R.; Völkle, E.; UBA-Texte 11/97, Berlin Erich Schmidt Verlag 1997
- UNEP: Global Environment Outlook 2000 <http://www.unep.org/geo2000/english/index.htm> (2004)
- United States Geological Survey (USGS): Minerals Commodity Summaries, United States Bureau of Mines, Washington DC. 2001 (www.usgs.gov)
- US Bureau of the Census: Historical Statistics of the United States, Colonial Times to 1970, Washington D.C.: US Government Printing Office, 1975
- US Bureau of the Census: Statistical Abstract of the United States 1991, 111th ed.,

- Washington, D.C.: US Government Printing Office, 1991.
- Van der Voet, E.; Guinée, J.B.; Udo de Haes, H.A. (eds.): Heavy Metals: A Problem Solved? (Kluwer Academic Publishers) Dordrecht 2000
- VDMA: Das Gebrauchtmashinengeschäft - Strategien, Konzepte, Fallbeispiele, VDMA-Verlag GmbH, Frankfurt am Main, 1999
- VDMA: Statistisches Handbuch für den Maschinenbau, VDMA-Verlag, Frankfurt am Main, 2000
- VDMA: www.vdma.de/branchen, Zugriff in 3/2001
- VDMA-Nord: Umdruck zu den Vorträgen des Workshops „Trockene Späne – saubere und gesunde Arbeitsplätze – Minimalmengen Kühlschmierung bewährt sich in der Praxis“ am 26. Januar 2000 auf der NORTEC 2000, VDAM – Landesgruppe Nord, Hamburg
- Velten, H.-J. Norddeutsche Affinerie, mündliche Mitteilung, 2000
- Verein Deutscher Eisenhüttenleute Kumulierter spezifischer Primärenergiebedarf von Stahlprodukten 1992.
- Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2243 Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte. Düsseldorf. 1993a
- Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI Richtlinie 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, 1993b
- Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4600 Kumulierter Energieaufwand - Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden Düsseldorf 1995
- Walter, G.; Läpple, D.: „Beschäftigungsorientierte Strukturpolitik für Arbeitsplätze in Stadtteilen und Quartieren, Forschungsprojekt der Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf 2002
- WCED World Commission on Environment and Development (Brundtland Kommission): Our Common Future, Genf 1987
- Weizsäcker, E. U. von; Lovins, A. B.; Hunter Lovins, B.: Faktor Vier. Doppelter Wohlstand - halbiertes Naturverbrauch. Der neue Bericht an den Club of Rome, Droemer Knauer Verlag, München 1995
- Wellmer, F. W.; Dalheimer, M.: Die Nutzung metallischer Rohstoffe am Beginn des 3. Jahrtausends, in: Kuckshinrichs, W.; Hüttner, K.-L. (Hrsg.): Nachhaltiges Management metallischer Stoffströme – Indikatoren und deren Anwendung, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Bd. 31, Jülich 2001
- Wellmer, F.-W.; Wagner, M.: Metallic Raw Materials – Constituents of our Economy. From the Early beginnings to the Concept of Sustainable Development, in: Gleich, A. von; Ayres, R.; Gößling-Reisemann, S. (eds.): Sustainable Metals Management, Kluwer Dordrecht 2004
- Wernick, I. K.; Ausubel, J. H.: National Metrics for Industrial Ecology, in: Schulze, P. (ed.): Measures of Environmental Performance and Ecosystem Condition, National Academy Press, Washington D. C. 1999
- Wernick, I. K.; Herman, R.; Govind, S.; Ausubel, J. H.: Materialization and Dematerialization: Measures and Trends, in: Daedalus, 125 (3) p. 171-198 1996
- Willebrandt, P.: Operational Results of Norddeutsche Affinerie Copper Smelter, in: C.A. Landolt (Hrsg.): The Paul E. Queneau Symposium, Extractive Metallurgy of Copper, Nickel and Cobalt, Vol II, 1361-1376, The Minerals, Metals & Materials Society, 1993
- Willeke, R.; Ewers, R.; Kreutzer, H. W.: Stahlschrott als Rohstoff für die Stahlerzeugung, Stahl und Eisen, 114 (4) (1994), 83-88

- Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hg.): Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 1996, Düsseldorf 1996: Verlag Stahleisen GmbH.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU): Welt im Wandel: Wege zur Lösung globaler Umweltprobleme, Jahresgutachten 1995, Bremerhaven 1995
- Wolf, S.: Untersuchungen zur Bereitstellung von Rohstoffen für die Erzeugung von Sekundäraluminium in Deutschland – Ein Informationssystem als Hilfsmittel für das Stoffstrommanagement, Dissertation RWTH Aachen 2000
- Yamada, K.; Eba, A.; Yamauchi, H.: Current status of the environmentally friendly technology for utilization of reusable metallic materials (steel recycling); o. O 1998.
- Zundel, S. et al.: Stoffstrommanagement. Zwischenbilanz einer Diskussion, in: Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht, Heft 3 S. 317-339, 1998
- Zundel, Stefan: Mehr Ökonomie als Ökologie – Nutzungsintensivierung und Nutzungsdauerverlängerung – ein kleines Fazit, in: Ökologisches Wirtschaften, 5/2000

16 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 _ Entropiebilanzen als Bewertungsansatz für den Umgang mit Ressourcen.....	27
Abbildung 2 _Entropische Effizienz – Das Beispiel Aluminium	29
Abbildung 3_ Tragekapazitäten nach der Steuerungsstrategie (Gleich 2002:14).....	34
Abbildung 4_ Aufbauorganisation eines Unternehmens mit unterschiedlichen Anknüpfungspunkten für Nachhaltigkeitsstrategien.....	71
Abbildung 5_ Produktionsmengen und -werte mineralischer Rohstoffen (weltweit im Jahr 1998) Aus: Wellmer; Wagner 2004.....	74
Abbildung 6_ Globale Produktion bedeutsamer Ressourcen 1870–1995 (Mio. t) (Aus: Messner 2004).....	75
Abbildung 7_ Globale Produktion von Nichteisenmetallen 1900–1995 (Mio t) (Aus: Messner 2004).....	76
Abbildung 8_ Globale Entwicklung der Kupfergewinnung in den vergangenen 5000 Jahren (Aus: Ayres et al 2002 auf Basis Landner; Lindeström 1999).	78
Abbildung 9_ Kupfergewinnung zwischen 1810 und 1999 ‚Westliche Welt‘ (Aus: Ayres et al 2002 auf Basis Landner&Lindeström 1999).	78
Abbildung 10_ Globale Primär-Kupferproduktion im 20. Jahrhundert (x-Achse = Jahreszahlen) (aus: Handke 2002).....	79
Abbildung 11 Preisentwicklung beim Kupfer 1870 bis 2000 (Aus: Ayres et al 2002).....	80
Abbildung 12 Weltproduktion an Primärblei im 20. Jh. (Aus: Erdmann 2002)	81
Abbildung 13_ Statische Reichweiten und geschätzte Explorationsnotwendigkeiten bei einigen mineralischen Rohstoffen (Aus: Wellmer, Wagner 2004)	87
Abbildung 14_ Wahrscheinliche Verteilung eines geochemisch seltenen Metalls in der Erdkruste (Aus: Ayres et al 2002).....	89
Abbildung 15_ Verhältnis der Produktion aus Sekundär- zu Primärmaterial bei Papier, Zink, Kupfer, Aluminium, Stahl und Blei in den USA im 20. Jh. (Aus: Wernick et al 1996).....	93

Abbildung 16_ Absteigende Recyclingkaskade für Aluminium aufgrund zunehmender Gehalte an Störstoffen bzw. Legierungselementen (Aus: Rombach 2004)	94
Abbildung 17_ Technische und ressourcen-orientierte Recyclingquoten für Aluminiumprodukte (aus Rombach 2004 nach Wolf 2000)	96
Abbildung 18_ Der Kupferkreislauf in Europa 1994 (aus: Spatari et al 2002).....	98
Abbildung 19_ Schematische Darstellung der Kupfererzeugung aus Erzkonzentraten, nach: Bartholomé & Ullmann 1985; Norddeutsche Affinerie o.J.; Krüger et al. 1995... 104	
Abbildung 20_ Die durchgezogene Linie in der linken Abbildung zeigt den Verlauf der spezifischen Entropieproduktion für die Herstellung von Kupfer aus PVC-haltigem Schrott bei variablem PVC-Anteil (x-Achse). Die punktierte Linie ist der Anteil des Anodenofens an der Gesamtentropieproduktion. Die rechte Abbildung zeigt den gleichen Verlauf für den Anteil aus Konverter und Schwebeschmelzofen. Der Anteil der Elektrolyse liegt bei konstant $0,44 \cdot 10^7$ J/Kt und wird nicht gezeigt.	111
Abbildung 21_ Spezifische Entropieproduktion für die Herstellung von raffiniertem Kupfer aus Schrotten mit unterschiedlichen Zusammensetzungen bei Einsatz im Konverter. Die untere x-Achse zeigt den Kupferanteil (α) des Schrottes, die obere den entsprechenden PVC-Anteil (γ), der SiO_2 -Anteil (β) ist hier null. Die durchgezogene Kurve zeigt den Verlauf für eine Elektrolyseeffizienz r von 0,84 (Anoden-Input zu Kathoden-Output), die punktierte Kurve zeigt den Verlauf für $r = 1$	112
Abbildung 22_ Spezifische Entropieproduktion für die Herstellung von raffiniertem Kupfer aus Schrotten mit unterschiedlichen Zusammensetzungen bei Einsatz im Konverter. Die untere x-Achse zeigt den SiO_2 -Anteil (β) des Schrottes, die obere den entsprechenden PVC-Anteil (γ), der Kupfer-Anteil (α) ist hier 10%. Die drei Kurven gelten für verschiedene Elektrolyseeffizienzen r von 0,84 bis 1.	112
Abbildung 23_ Entwicklung des Stahlbestandes in der Technosphäre der BRD (Schätzung)	116
Abbildung 24_ Index der Rohstahlerzeugung in der BRD (1982 = 100)	117
Abbildung 25_ Szenarien zum Verhältnis Stahlbedarf und Schrottangebot.....	118
Abbildung 26_ Vereinfachte Darstellung des Stahlkreislaufs.....	119
Abbildung 27_ Prognose der Entwicklung der Kupfergehalte in zwei Schrottqualitäten [Yamada et al. O.J.].....	120
Abbildung 28_ Prognose der Kupfergehalte in verschiedenen Schrottsorten [IISI 2000]	120
Abbildung 29_ Kupferanwendungen im Automobilbau (Beispiele)	121
Abbildung 30_ Kupfermengen in ausgewählten Anwendungen im Auto (Beispiele) (Schmidt 2001).....	121
Abbildung 31_ Verteilung von Kupfer in Mittelklassefahrzeugen	122
Abbildung 32_ Verteilung von Kupfer in Kleinfahrzeugen	122
Abbildung 33_ Beispiele für die Anwendung von Stellmotoren im Auto.....	122
Abbildung 34_ Kupferentfrachtung von Alautos [Russo 1998].....	124
Abbildung 35_ Produkte der ISPAT HSW und ihre Anteile (ISPAT HSW 2001).....	126
Abbildung 36_ Verhältnis von Eisenschwammanteil und Cu-Gehalt im Stahl bei der ISPAT HSW [ISPAT HSW 2001].....	127
Abbildung 37_ Entwicklung und Prognose der Cu-Gehalte in verschiedenen Schrottsorten der ISPAT HSW [ISPAT HSW 2001]	130
Abbildung 38_ Vergleich der SOLL- und IST -Kupfergehalte bei der GMH [GMH 2001].....	134

Abbildung 39_ Einflussfaktoren bei der Konstruktion von Autos [VW 2000]	135
Abbildung 40_ Erlössituation für demontierte Altautokomponenten [Knode 2000 pers.com.]	136
Abbildung 41_ Ökonomie der Demontage [Schmidt 2001]	138
Abbildung 42_ Entwicklung der Kupfergehalte in zwei Schrottsorten [Birat 1998]	140
Abbildung 43_ Stahlmodell.....	144
Abbildung 44_ Ergebnisse des Szenarios „Faktor 4; 30/70“	147
Abbildung 45_ Rasterelektronische Aufnahme der Strahlmittelabfälle	153
Abbildung 46_ Probekörper für Reibbeläge	154
Abbildung 47_ Mikrostruktur der Probekörper.....	154
Abbildung 48_ Stoffstrommodell der Verwertung von kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämmen in einem Heißwindkupolofen	159
Abbildung 49_ Stoffstrommodell der Verwertung von kühlenschmierstoffhaltigen Metallschleifschlämmen in einem Zementofen.....	160
Abbildung 50_ Massenströme im Kupolofen	161
Abbildung 51_ Energieströme im Kupolofen	162
Abbildung 52_ Energieströme im Zementofen	163
Abbildung 53_ Massenströme im Zementofen.....	163
Abbildung 54_ KSS Verwertungsvergleich hinsichtlich CO ₂ -Emissionen.....	165
Abbildung 55_ KSS Verwertungsvergleich hinsichtlich Energieaufwand	165
Abbildung 56_ KSS Verwertungsvergleich hinsichtlich Massenbilanz	165
Abbildung 57_ Modellstruktur des Sinterverfahrens der Firma Oesterreich.....	167
Abbildung 58_ „Vorketten für die Energieträger“ (links) sowie „Betriebliche Umwandlungsprozesse“ (rechts).....	168
Abbildung 59_ Sankey Diagramm der Stoffströme (Massen)	169
Abbildung 60_ Gesamter kumulierter Energieaufwand (KEA)	170
Abbildung 61_ Kosten für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe	170
Abbildung 62_ Werkstück, Ausgangsmaterial SW 27, Markierung: Änderung gegenüber Serienteil.....	175
Abbildung 63_ Schruppwerkzeug $\epsilon = 80^\circ$ und $\epsilon = 55^\circ$	178
Abbildung 64_ Ausführung des Bohrers, oben Schneiden und Spannuten, unten Schaft. Links ungünstig, rechts richtig	179
Abbildung 65_ Schematische Darstellung der typischen Schwachstellen in den betrieblichen Daten kleinerer und mittlerer Metallverarbeitender Betriebe	187
Abbildung 66_ Anforderungen an Systeme zum Materialfluss-Controlling	188
Abbildung 67_ Definition der Controllingbereiche	189
Abbildung 68_ Anlegen und (Text)der Materialgruppen.....	190
Abbildung 69_ Beschreibung der Erfassung & Lieferung der Materialart	190
Abbildung 70_ Beschaffungsvorgang für KSS-Konzentrate.....	191
Abbildung 71_ Gezielte Kennzahlenabfrage	191
Abbildung 72_ Lebenszyklusphasen und Kreislaufwirtschaft.....	194

Abbildung 73_Veränderungsmöglichkeiten und Effekte bei der Produktgestaltung (Steinhilper 1995: 4/3.1.2).....	195
Abbildung 74_Werteniveaus der Kreislaufwirtschaft.....	196
Abbildung 75_Idealtypische Formen „öko-effiziente Dienstleistungen“ (Schrader 2001:75 nach Bierter et al. 1996)	197
Abbildung 76_Lebens-, Nutzungs- und Verfügungsdauer (Hirschl et. al.2000:13)	198
Abbildung 77_Kreislaufwirtschaft (Schubert et. al.1997 S.13)	203
Abbildung 78_Leitlinie kreislaufgerechte Produktgestaltung (Brahmer-Lohss: 2001).....	213
Abbildung 79_Funktionsbaum - Modulbildung	215
Abbildung 80_Ventil (Mieth 1989)	220
Abbildung 81_Variation der Schnittstellen zwischen den beiden Gehäusen	221
Abbildung 82_Wirkungsgrade unterschiedlicher Ladesysteme.....	228
Abbildung 83_Energetische Amortisation der Fahrzeugherstellung durch Effizienzverbesserungen im Betrieb für Fahrersitzgeräte und Mitgängergeräte.	235
Abbildung 84_ Geldwerte des Gebrauchsmaschinenhandels in Deutschland (1995)	247
Abbildung 85_Massenströme des Gebrauchsmaschinenhandels in Deutschland (1995)	247

17 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 _ Kriterienraster für eine integrierte Nachhaltigkeitsbewertung.....	16
Tabelle 2_ Anreicherungs-faktoren derzeit durchschnittlich abgebauter Erze	84
Tabelle 3_Globale Reserven, Reservebasis und Ressourcen für Aluminium und Kupfer	88
Tabelle 4_ Chemical compositions of EAF dusts	92
Tabelle 5_ Principal Uses of Copper 1990 (aus: Graedel et al 2002)	97
Tabelle 6_ Stoff- und Energiebilanz des Outokumpuprozesses bezogen auf die Erzeugung von 1 t Kupferstein.....	105
Tabelle 7_ Zusammensetzung des Erzkonzentrats in Gewichtsprozent nach Davenport & Partelpoeg 1987	106
Tabelle 8_ Berechnete Zusammensetzung des Erzkonzentrats.....	106
Tabelle 9_ Entropiebilanz des Schwebeschmelzofens für die Produktion von einer Tonne Kupferstein. Die Wärmeverluste beinhalten Leitungs- und Strahlungsverluste. Die Werte wurden nach thermodynamischen Standardquellen berechnet.	107
Tabelle 10_ Stoff-, Energie- und Entropiebilanz für den Konverterprozess (Peirce-Smith Konverter)	108
Tabelle 11_ Stoff-, Energie- und Entropiebilanz für den Anodenofen	108
Tabelle 12_ Stoff-, Energie- und Entropiebilanz für die Elektrolyse	109
Tabelle 13_ Entropieproduktion der vier Prozesse bezogen auf die Produktion von einer Tonne Kathoden. Die Bedeutung des Entropiekoeffizienten wird im Kap. 7.6 erläutert.....	109
Tabelle 14_ Entropieproduktion pro Tonne Kupferkathoden aus Kupferschrott. Der Kupferanteil des Schrotts wurde zu 100% angenommen und über den	

Anodenofen der Prozesskette zugeführt.	111
Tabelle 15_ Spezifische Entropieproduktion für die Herstellung von Kupfer aus reinem Kupferschrott. Die zweite Spalte bezieht sich auf den Einsatz von Schrott im Anodenofen, die dritte Spalte auf den Einsatz im Konverter.	113
Tabelle 16_ Ansätze zur Kupferentfernung aus Stahlschmelzen.....	125
Tabelle 17_ Metallischer Einsatz bei IHSW in 2000.....	128
Tabelle 18_ Beispiel für zwei Gattierungsvarianten eines Qualitätsstahls	129
Tabelle 19_ Schrottsorten und Kupfergehalte bei der GMH GmbH	131
Tabelle 20_ Schrottmenü bei der GMH GmbH [pers.com. GMH GmbH].....	132
Tabelle 21_ Kupfergehalte in Abhängigkeit vom Schrottmenü und durchschnittliche Ist-Gehalte der Schmelzen in 2000 [pers.com. GMH GmbH].....	133
Tabelle 22_ Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Lichtmaschine- und Anlasserdemontage (Beispielszenarien); [Knode, Retek GmbH pers. Com]	137
Tabelle 23_ Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Kabelbaumdemontage [Knode, Retek GmbH pers. Com]	137
Tabelle 24_ Kostenbetrachtung Demontage und Shredder nach Russo (1998) (Angaben in französischen Franc bezogen auf die Situation in Frankreich).....	139
Tabelle 25_ PKW (M1) -Bestand und endgültige Stilllegungen in Norddeutschland (Stand 1998, Quelle: Kraftfahrtbundesamt).....	141
Tabelle 26_ Demontagebetriebe und Shredder in Norddeutschland (Stand: 20.6.02)	142
Tabelle 27_ Stahlwerke in Norddeutschland.....	142
Tabelle 28_ Parameter und Werte des Stahlmodells.....	146
Tabelle 29_ Teilnehmer am Workshop "Die Zukunft des Stahlkreislaufs - Kupfer als Störelement", 12. Juni 2001.....	149
Tabelle 30_ Chemische Zusammensetzung des Strahlmittels (%).....	152
Tabelle 31_ <i>Chemische Zusammensetzung von Baustahl</i>	152
Tabelle 32_ Übersicht der Bewertungsergebnisse der beiden „Vergleichsszenarien“	164
Tabelle 33_ Werkzeuge für die Bearbeitung	176
Tabelle 34_ Schnittdaten für die Minimalmengenkühlschmierung, 1. Seite.....	179
Tabelle 35_ Merkmale zur Beurteilung der Werkstückqualität	180
Tabelle 36_ Anforderungen an die kreislaufgerechte Produktgestaltung.....	207
Tabelle 37_ Bearbeitungswahrscheinlichkeiten von Modulen im Varivent - Ventil	217
Tabelle 38_ Gebräuchliche Lebensdauer als Grundlage für die kalkulatorische Abschreibung aus: Dicke und Schneider, 1994.....	226
Tabelle 39_ Kosten verschiedener Ladegeräte für 48V-750Ah-Batterie	228
Tabelle 40_ Flottenmanagement Beispielprojekt: Fischverarbeitender Betrieb; zur Verfügung gestellte Daten.....	229
Tabelle 41_ Umfang des Bilanzraumes	232
Tabelle 42_ Energetische Bewertung der Herstellung neuer Fahrzeuge : Fahrersitzgeräte (oben) Energetische Amortisation der Fahrzeugherstellung durch Effizienzverbesserungen im Betrieb: Fahrersitzgeräte (unten).....	233
Tabelle 43_ Energetische Amortisation der Fahrzeugherstellung durch Effizienzverbesserungen im Betrieb: Mitgängergeräte	234

Tabelle 44_ Energetische Bewertung der Herstellung neuer Fahrzeuge : Mitgängergeräte	234
Tabelle 45_ Energieeinsparung beim Flottenbetrieb durch Wegstreckenoptimierungen von 15%, 20% und 25% und Amortisation Fahrzeugherstellung durch Energieeinsparung.....	235
Tabelle 46_ Energieeinsparpotentiale durch Einsatz effizienter Ladetechnik	237
Tabelle 47_ Umsatz Maschinenbau weltweit und regional	243
Tabelle 48_ Deutschland: Branchen des verarbeitenden Gewerbes (VDMA, 3/2001: Zahl der Unternehmen: Daten für 1999; Beschäftigte und Umsatz: Daten für 2000)	244
Tabelle 49_ Expertenschätzungen zum Gebrauchtmachinesmarktvolumen in Deutschland	246